UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO JOÃO DEL REI
Departamento de Ciências Térmicas e dos Fluidos
CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNÓLOGICA DE MINAS GERAIS
Departamento de Engenharia Mecânica
Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Energia

Natália Aparecida Ramos Ferreira

O Uso da Técnica Ultrassônica na Eficiência Energética de Sistemas de Ar Comprimido

São João del-Rei - MG
2020

Natália Aparecida Ramos Ferreira

O Uso da Técnica Ultrassônica na Eficiência Energética de Sistemas de Ar Comprimido

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia da Energia, Em Associação Ampla entre o Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais e a Universidade Federal de São João del-Rei, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia da Energia.

Orientador: Prof. Dr. Jorge Nei Brito

São João del-Rei - MG

2020

Ficha catalográfica elaborada pela Divisão de Biblioteca (DIBIB)
e Núcleo de Tecnologia da Informação (NTINF) da UFSJ,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Ferreira, Natalia Aparecida Ramos.
F383u O Uso da Técnica Ultrassônica na Eficiência Energética de Sistemas de Ar Comprimido / Natalia Aparecida Ramos Ferreira ; orientador Jorge Nei Brito. -- São João del-Rei, 2020.
102 p.

Dissertação (Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Energia) -- Universidade Federal de São João del-Rei, 2020.

1. Sistemas de Ar Comprimido. 2. Eficiência Energética. 3. Técnica Ultrassônica. 4. Manutenção. I. Brito, Jorge Nei, orient. II. Título.

Natalia Aparecida Ramos Ferreira

O Uso da Técnica Ultrassônica na Eficiência Energética de Sistemas de Ar Comprimido

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia da Energia, Em Associação Ampla entre o Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais e a Universidade Federal de São João Del Rei, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia da Energia.

Aprovado(a) em, 28 de fevereiro de 2020

Banca Examinadora

Prof. Dr. Jorge Nei Brito
(Orientador, UFSJ).

Prof. Dr. Jánes Landre Júnior
(Examinador externo, PUC-MG).

Prof. Dr. José Antônio da Silva
(Examinador interno, UFSJ).

São João Del Rei – MG
2020

Dedicatória

Dedico este trabalho à minha querida tia Margarida, grande colaboradora e incentivadora, que infelizmente não pôde ver a conclusão desse projeto. Sua lembrança me inspira e me faz persistir.

Agradecimentos

Primeiramente agradeço a Deus, por tudo que tenho em minha vida.

Meus sinceros agradecimentos ao Prof. Jorge Nei Brito, pela disponibilidade manifestada para a orientação deste trabalho e utilidade dos conselhos dados para a sua execução, por ter partilhado o seu tão vasto conhecimento nesta área de estudo e me ter orientado ao longo do percurso. Apenas, desta forma, foi possível alcançar os objetivos que nos propusemos no início deste trabalho.

À Universidade Federal de São João del Rei pelo apoio financeiro. Aos professores e funcionários do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia que tanto contribuíram para o meu desenvolvimento,

A todos os meus colegas do Mestrado pela excelente convivência, troca de experiências e bons momentos que proporcionaram, especialmente ao meu amigo Vagner Vieira Reis.

À empresa Melo Automação pelo suporte oferecido à pesquisa experimental.

Aos colegas engenheiros Vinicius Chitarra e Roberto Bianchini.

À minha família, em especial às minhas irmãs, Gabriela e Nívea, agradeço a paciência, as constantes palavras de incentivo e o apoio fiel no meu percurso acadêmico.

“O êxito da vida não se mede pelo caminho que você conquistou, mas sim pelas dificuldades que superou no caminho”.

Abraham Lincoln

Resumo

Na abordagem contemporânea da manutenção, vazamentos em redes de ar comprimido podem gerar custos significativos e problemas de desempenho em sistemas pneumáticos. O entendimento destes fatores é fundamental para a elaboração da estratégia de manutenção dos ativos. Como parte importante do negócio, a área de manutenção garante a eficácia na produção industrial de grande escala. O correto uso das técnicas de manutenção devem garantir a excelência e confiabilidade dos equipamentos e instalações. Neste contexto, o objetivo deste trabalho é apresentar uma visão geral do estado da arte de inspeção de vazamentos em redes de ar comprimido utilizando a Técnica Ultrassônica, bem como verificar sua aplicabilidade e viabilidade no contexto da manutenção. Através de um estudo de caso é demonstrado o potencial de economia de energia elétrica em uma indústria, analisando principalmente as possibilidades de redução dos desperdícios de energia por vazamentos. De acordo com a auditoria realizada no estudo de caso, perdas da ordem de 57% da geração total de ar comprimido podem ser evitadas com adoção das medidas sugeridas, sendo que os vazamentos são responsáveis pelas maiores perdas, representando 34,1% do ar comprimido produzido. A diminuição dos custos energéticos da central de ar comprimido reflete-se diretamente na diminuição do custo de produção fabril aumentando a competitividade das empresas no mercado.

Palavras-chave: Sistemas de Ar Comprimido, Eficiência Energética, Técnica Ultrassônica, Manutenção.

Abstract

In the contemporary approach to maintenance, leaks in air networks can generate significant costs and performance problems in pneumatic systems. Understanding these factors is essential for the elaboration of the asset maintenance strategy. As an important part of the business, the maintenance area guarantees efficiency in large-scale industrial production. The correct use of maintenance techniques must guarantee the excellence and reliability of equipment and installations. In this context, the objective of this work is to present an overview of the state of the art of leak inspection in compressed air networks using the Ultrasonic Technique, as well as to verify its applicability and feasibility in the context of maintenance. Through a case study, the potential for saving electricity in an industry is demonstrated, analyzing the real possibilities of reducing energy waste due to leaks. According to the audit carried out in the case study, losses in the order of 57% of the total generation of compressed air can be avoided by adopting the suggested measures, with leaks being responsible for the largest losses, representing 34,1% of compressed air produced. The decrease in the energy costs of the compressed air plant is directly reflected in the decrease in the cost of manufacturing production, increasing the competitiveness of companies in the market.

Keywords: Compressed Air Systems, Energy Efficiency, Ultrasonic Technique, Maintenance.

Lista de Ilustrações

Figura 1. Matriz Energética Brasileira. 24
Figura 2. Matriz Elétrica Brasileira 25
Figura 3. Participação por setor no consumo de energia elétrica 25
Figura 4. Consumo de energia no setor industrial 26
Figura 5. Custo do ciclo de vida SAC 30
Figura 6. Compressores e respetivas tecnologias de compressão 32
Figura 7. Curvas características pressão - vazão 33
Figura 8. Concentração dos contaminantes quando o volume de ar é reduzido com a compressão 34
Figura 9. Exemplo de uma instalação de tratamento de ar 38
Figura 10. Sistema de recolhimento de condensados num SAC 39
Figura 11. Cadeia do SAC. 45
Figura 12. A evolução do desempenho da manutenção 51
Figura 13. Curva característica da vida do equipamento 55
Figura 14. Detectores Ultrassônicos Digitais (a) Leakshooter LKS1000-V3 (b) Testo Sensör LD - Ultrasonik kaçak dedektörü. 57
Figura 15. Detector Ultrassônico Inspector 400 - CMIN 400. 57
Figura 16. Detectores de Vazamentos Ultrassônicos (a) Detector de vazamento de ar comprimido compacto (b) Detector de vazamento de ar comprimido com visor digital 58
Figura 17. *Kit* do Detector Ultrassônico JORC. 58
Figura 18. Princípio funcionamento Detector de Vazamento Ultrassônico 59
Figura 19. Modelo Conceitual das Etapas do PDCA. 67
Figura 20. Etapas do Programa de uso Racional de Energia em Empresas 67
Figura 21. Sensores utilizados para as medições 69
Figura 22. Sensores utilizados para as medições 69
Figura 23. Registrador de dados DS 300 70
Figura 24. Condição de limpeza na sala dos compressores 72
Figura 25. Presença de água na tubulação 74
Figura 26. Estado de conservação da tubulação 74
Figura 27. Estado de conservação dos filtros, regulador e lubrificador 76
Figura 28. Detector ultrassônico utilizado - Leak Detector LD 300. 77
Figura 29. Identificação dos Vazamentos Ultrassônico 78
Figura 30. Número de Vazamentos por criticidade 78
Figura 31. Mangueira de limpeza ligadas diretamente a rede de ar. 80
Figura 32. Detector de vazamento ultrassônico, Sonochek 84

Figura 33. Condição dos equipamentos inspecionados. 85
Figura 34. Classificação dos vazamentos quanto à intensidade sonora. 85
Figura 35. Equipamentos com intervenção urgente e programada. 86

Lista de Tabelas

Tabela 1. Análise descritiva das publicações relevantes para a revisão 22
Tabela 2. Usos do ar comprimido nos setores industriais. 29
Tabela 3. Medidas de Melhoria em SAC. 46
Tabela 4. Perdas de vazão e potência com vazamentos. 50
Tabela 5. Dados Técnicos dos Compressores 69
Tabela 6. Dados da Pressão no Sistema. 70
Tabela 7. Dados de Vazão e Consumo. 70
Tabela 8. Consumo Elétrico na Geração de AC. 71
Tabela 9. Custo da Geração de Ar Comprimido. 71
Tabela 10. Custo Anual do Dreno de Condensado dos Tanques Ligas Binárias. 75
Tabela 11. Vazamentos por Setor/Ramal e Potencial de Economia 79
Tabela 12. Custo do Misturador de Potassa. 79
Tabela 13. Custo do Filtro de Manga Criolito 81
Tabela 14. Resumo do Potencial de Economia 82
Tabela 15. Análise da Viabilidade Econômica 83

Lista de Abreviaturas e Siglas

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

AC: Ar Comprimido

ANEEL: Agência Nacional de Energia Elétrica

ASNT: *American Society for Nondestructive Testing* (Sociedade Americana de Ensaios Não Destrutivos)

ASTM: *American Society for Testing and Materials* (Sociedade Americana de Ensaios e Materiais)

BSNT: *British Society for Nondestructive Testing* (Sociedade Britânica de Ensaios Não Destrutivos)

CFM: *Cubic Feet per Minute* (pés cúbicos/minuto)

CPU: *Central Processing Unit* (Unidade Central de Processamento)

CONPET: Programa Nacional de Racionalização do Uso dos Derivados do Petróleo e do Gás Natural

DZP: *Deustche Gesellschaft für Zerstöerungsfreie Prüfung* (Sociedade Alemã de Ensaios Não Destrutivos)

EPE: Empresa de Pesquisa Energética.

ETE: Estação de Tratamento de Efluentes.

FAD: *Free Air Delivery* (Ar entregue na saída do compressor)

FRL: Filtro regulador lubrificador

INMETRO: Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial

ISO: *International Organization for Standardization* (Organização Internacional de Normalização)

LASID: Laboratório de Sistemas Dinâmicos

LED: *Light-Emitting Diode* (diodo emissor de luz)

NBR: Normas Brasileiras

PBE: Programa Brasileiro de Etiquetagem

PDP: *Pressure Dew Point* (Ponto de Orvalho sob Pressão)

PEE: Programa de Eficiência Energética

PROCEL: Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica

RAC: Reservatórios de Ar Comprimido

SAC: Sistema de Ar Comprimido

UR: Umidade Relativa

VEV: Variador Eletrônico de Velocidade

Lista de Símbolos

bar: Unidade de Pressão Atmosférica

cm: Centímetro

CO_2 : Dióxido de carbono

dB: Decibel

Ø: Diâmertro

dBµV: Unidade logarítmica de medida de tensão

GWh: Gigawatt-hora

ºC: Grau Celsius

ºF: Grau Fahrenheit

h: hora

HP: Horse-power (Cavalo-vapor)

kHz: Quilohertz

KWh: Quilowatt-hora

l/s: Litros por segundo

l/h: Litros

m^3: Metro cúbico

µ: micro

m^3/h: Metro cúbico por hora

“: Polegada

%: Porcentagem

pH: Potencial Hidrogeniônico

PSI: Unidade de Pressão Atmosférica

PSIG: Unidade de Pressão Manométrica

R$: Real

Sumário

CAPÍTULO 1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS 17
1.1. INTRODUÇÃO 17
1.2. JUSTIFICATIVAS 18
1.3. OBJETIVOS 19
1.4. LIMITAÇÕES 19
1.5. DESCRIÇÃO DO TRABALHO 20
CAPÍTULO 2 BREVE REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 21
2.1. ENERGIA 23
2.1.1. Matriz Energética *23*
2.1.2. Matriz Elétrica *24*
2.1.3. Eficiência Energética *26*
2.2. AR COMPRIMIDO 28
2.2.1. Sistema de Ar Comprimido *30*
2.2.1.1. Geração 31
2.2.1.1.1. Compressores 31
2.2.1.1.2. Qualidade do Ar 34
2.2.1.1.3. Secadores 35
2.2.1.1.4. Filtros 37
2.2.1.1.5. Condensados 39
2.2.1.1.6. Reservatório de Ar 40
2.2.1.1.7. Sistema Descentralizado 41
2.2.1.1.8. Sistema Centralizado 42
2.2.1.2. Distribuição 43
2.2.1.3. Consumo Final 44
2.2.2. Medidas de Economia de Energia *45*
2.2.2.1. Redução dos Vazamentos 49
2.3. MANUTENÇÃO 51
2.3.1. Manutenção Preditiva *52*
2.3.1.1.Inspeções de vazamentos no contexto da Manutenção 53
2.3.1.2 Gestão de ativos 54
2.3.2. .Principais Técnicas de Manutenção Preditiva *54*
2.4. ULTRASSOM 56
2.4.1.1.1. Medições Experimentais 62
2.4.2. Metodologia de INSPEÇÃO *62*
2.4.2.1. Pré-identificação e Correção dos Vazamentos Audíveis 63
2.4.2.2. Definição de Rotas e Zonas de Inspeção 63
2.4.2.3. Inspeção em Campo 63
2.4.3. Estimativa de Custos *65*
2.5. AUDITORIA ENERGÉTICA 65
CAPÍTULO 3 ESTUDO DE CASO 68
3.1. AUDITORIA INICIAL *68*
3.1.1. Identificação dos Problemas e Melhorias 72
3.1.1.1. Sala dos Compressores 72
3.1.1.2. Rede de ar Comprimido 74
3.1.1.3. Usos Finais 75
3.2. INSPEÇÃO REALIZADA EM JUNHO DE 2019 ..... *83*

3.2.2. Equipamentos Utilizados 84
3.3. RESULTADOS E DISCUSSÕES *86*
CAPÍTULO 4 CONCLUSÃO **87**
ANEXO A 89
ANEXO B 91
ANEXO C 95
REFERÊNCIAS 97

CAPÍTULO 1
CONSIDERAÇÕES INICIAIS

1.1. INTRODUÇÃO

O ar comprimido (AC) é uma forma de energia largamente difundida na generalidade da indústria. Atualmente, a produção desta utilidade industrial é diretamente proporcional ao consumo de energia elétrica. Pode-se até dizer que o ar comprimido é o ar eletricamente capacitado a realizar trabalho. Ou seja, perda de ar comprimido significa perda de energia elétrica. Tendo em vista os aspectos citados, engenheiros, técnicos e usuários do ar comprimido devem procurar otimizar as suas instalações, objetivando a eficientização energética tanto na geração quanto no tratamento, distribuição e consumo do ar comprimido. Acresce a tudo isto o fato de o ar comprimido ser uma forma de energia limpa, segura e fácil de manusear, o que lhe permite ter um papel fundamental na maioria dos processos industriais.

A energia é, sem dúvida, uma das grandes preocupações da sociedade, não só pela dependência do seu uso, como também pelo impacto ambiental, econômico e social que causa. Ao longo dos últimos anos tem havido uma crescente consciencialização nesse sentido e, por isso, vários têm sido os esforços dos governos no estabelecimento de limites para as emissões de poluentes e fomentar o uso de energia sustentável a partir de fontes limpas e renováveis. Mesmo com uma elevada penetração de energias renováveis na matriz energética mundial, estas não estão sincronizadas com o consumo de energia elétrica e, por isso, a queima de combustíveis fósseis para a produção de energia elétrica continua a ser indispensável (Oliveira, 2018).

Na atualidade, a pressão por resultados financeiros, a ameaça do esgotamento das reservas de combustíveis fósseis, a constante elevação dos preços da energia e as preocupações ambientais, leva à utilização da energia de uma forma mais consciente.

Nesse contexto, a energia está sendo considerada um fator de produção tão importante quanto o capital, a mão-de-obra ou a matéria-prima. As empresas estão cada vez mais conscientes da necessidade de desenvolver e a implementar programas de otimização e gestão energética, como uma solução para os problemas de consumos atuais, combater as alterações climáticas e manter-se competitivas no mercado. Consequentemente, a identificação dos vazamentos é fundamental para aumentar a eficiência energética do sistema e reduzir custos.

Os vazamentos em sistema de ar comprimido (SAC) são a principal perda relacionada à distribuição de ar comprimido na indústria, podendo chegar a 20% da energia consumida na produção de AC para plantas praticamente sem manutenção. Uma estratégia para identificação dos vazamentos é a realização periódica de uma auditoria nas instalações empregando detectores de vazamento ultrassônicos. Os vazamentos de AC são uma das principais perdas identificadas com grande potencial de retorno financeiro (SAIDUR *et al*., 2010).

Pretende-se assim, abordar o SAC, focando nas perdas em redes de distribuição, através de inspeção ultrassónica, de forma a sensibilizar os diversos agentes para a contribuição potencial dessa medida de melhoria energética e assim difundir boas prática na indústria.

1.2. JUSTIFICATIVAS

Em uma planta industrial, motores que alimentam os compressores de ar são tipicamente os maiores usuários de eletricidade. Um sistema de ar comprimido corretamente gerenciado pode economizar energia, reduzir manutenção, diminuir o tempo de inatividade, aumentar o rendimento da produção e melhorar a qualidade do produto. Uma das facetas mais importantes de um programa de gerenciamento de ar comprimido é a detecção de vazamentos.

Um método simples e pouco intrusivo para implementação de um programa de detecção de vazamentos é a utilização de um detector de vazamento ultrassônico. Usando

um dispositivo ultrassônico, é possível detectar vazamentos acima do ruído de fundo de uma sala de plantas industriais. O ultrassom tem um comprimento de onda curto e é muito mais direcional do que o som audível. Combinado com a diferença de frequências facilita a diferenciação entre o som audível e o ultrassom, portanto, a localização dos vazamentos.

1.3. OBJETIVOS

Verificar a importância do ar comprimido para setor industrial e como uma redução do seu consumo pode aumentar a eficiência energética. Além disso abordar o fator manutenção, ou seja, como o uso da Técnica de Ultrassônica, pode trazer vantagens competitivas às Organizações que adotam a política de Manutenção Preditiva.

Apresentar uma alternativa para a redução do consumo de energia elétrica no sistema de ar comprimido de uma planta industrial utilizando a Técnica de Ultrassônica para detecção de vazamentos ultrassônicos em sua geração, distribuição e consumo final, de forma a deixá-lo mais eficiente.

Avaliar a aplicação da Técnica de Ultrassônica, bem como a sua viabilidade técnica e retorno financeiro através de aplicação industrial, em um estudo de caso.

1.4. LIMITAÇÕES

O objetivo inicial desse trabalho consistia na construção de uma bancada didática para realização de testes, visando quantificar as perdas energéticas através dos vazamentos ultrassônicos de ar comprimido. Cumprida essa etapa, o próximo passo seria desenvolver um programa computacional para transformar o ruído ultrassônico em dados a serem tratados através de processamento de sinais, utilizando a Técnica de Transformada de Fourier, de forma a identificá-lo através de espectros relacionando as possíveis frequências determinísticas com a intensidade sonora. Acredita-se que essa pesquisa seria de grande contribuição para o entendimento e avanço da técnica ultrassônica de detecção de

vazamentos, haja vista que, pela revisão bibliográfica, poucos estudos foram encontrados relacionados ao tema.

Não conseguindo atingir seu objetivo inicial, buscou-se realizar uma inspeção em um sistema de ar comprimido de uma indústria. Embora algumas tentativas tenham sido feitas, por limitações do detector de vazamento ultrassônico disponível no Laboratório de Sistemas Dinâmicos (LASID), além da necessidade de outros equipamentos para complementar o estudo de viabilidade econômica e o cronograma de paradas da indústria na qual as inspeções seriam feitas, tornou inviável o estudo de caso *in company*.

No entanto, será apresentado um estudo de caso~~,~~ referente a linha de ar comprimido de uma indústria localizada na região do Campos das Vertentes, Minas Gerais, realizada por uma empresa especialista em inspeções de vazamentos ultrassônicos.

1.5. DESCRIÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho está estruturado em 05 (cinco) capítulos, como apresentado a seguir.

Capítulo 1 - **Introdução**: Apresentação do assunto, descrevendo-se a motivação, o objetivo e as limitações do estudo.

Capítulo 2 - **Breve Revisão Bibliográfica**: Constituído por uma síntese dos conceitos sobre energia, o uso do ar comprimido na indústria, as fundamentações teóricas sobre manutenção preditiva e finalmente a teoria acerca do funcionamento do equipamento bem como o modo de conversão e suas aplicações.

Capítulo 3 - **Comentários e Análise Prática**: Apresenta um estudo de caso em uma indústria da região, procedimentos, análises de resultados, comentários e diagnósticos.

Capítulo 4 - **Conclusões**: São apresentadas informações relevantes e relacionadas à prática da técnica preditiva de ultrassom aplicada à sistemas de ar comprimido.

CAPÍTULO 2
BREVE REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O principal ponto discutido nesse trabalho é a técnica de detecção de vazamentos ultrassônicos em sistemas de ar comprimido. O início da pesquisa se deu por conhecer a técnica de ultrassom e sua aplicabilidade dentro do contexto da manutenção. Na sequência uma busca refinada foi realizada. Dentre as publicações incluídas na revisão sobre o uso da técnica de detecção de vazamentos ultrassônicos em sistemas de ar comprimido, foram identificados 4 artigos em periódicos e 5 trabalhos em conferências. Informações sobre as publicações são exibido na Tabela 1.

Os artigos revisados foram publicados entre 1999 e 2016 e, como pode ser visto na Tabela 1, a maioria das publicações são a partir de 2007. Isso pode ser uma indicação de um aumento do interesse no tópico estudado. Os artigos publicados antes de 1999 foram encontrados na busca sistemática de literatura. No entanto, nenhum desses artigos corresponde os critérios de pesquisa e, portanto, foram omitidos. Houve maior diversidade na publicação dos artigos da conferência.

Além disso, foram encontrados alguns trabalhos acadêmicos nacionais e internacionais sobre o tema, mas estes não foram incluídos, uma vez que não foram publicados em periódicos ou anais de conferências.

Os métodos aplicados nos artigos variaram de estudos de engenharia para estudos de caso. Os estudos de engenharia tinham um escopo técnico que incluía cálculos e aspectos teóricos, mas não casos empíricos, enquanto os estudos de caso se concentraram principalmente em dados reais produzidos por casos reais. Uma abordagem mista também foi identificada no caso de estudos de engenharia, que muitas vezes começaram com uma perspectiva de engenharia e depois ilustrou aplicando evidências empíricas.

Tabela 1. Análise descritiva das publicações relevantes para a revisão

Autor (es)	Ano	Título	Publicação	País de Origem do Estudo
Helen Little; Stuart Ditchburn; Henry Mackertich,	1999	Ultrasound leak detection	Conference: Safety on Offshore Installations	Reino Unido
Muench, HJ; Streuber, W	2002	Fast detection of leakages. Ultrasonic sensors: Fast and reliable detection of leakages in compressed-air networks	MM. Maschinenmarkt	Alemanha
Joseph M. Buckley	2007	An overview of the predictive maintenance applications of airborne ultrasound testing	4th International Conference on NDT	Grécia
Hamish Wolstencroft; James Neale	2008	Characterisation of compressed air leaks using airborne ultrasound	Annual Conference of The Australian Acoustical Society	Nova Zelandia
Bandes, Alan	2009	Ultrasonic Condition Monitoring in Power Plants	ASME Power Conference	EUA
Slobodan Dudić; Ivana Ignjatović; Dragan Šešlija; Vladislav Blagojević; Miodrag Stojiljkovic	2012	Leakage quantification of compressed air using ultrasound and infrared thermography	Measurement	Sérvia
Bandes, Alan	2013	Ultrasonic condition monitoring	Asset Management & Maintenance Journal	EUA
Pingping Liao, Maolin Cai, Yan Shi and Zichuan Fan	2013	Compressed air leak detection based on time delay estimation using a portable multi-sensor ultrasonic detector	Measurement science and technology	China
Thomas Guenther ; Andreas Kroll	2016	Automated detection of compressed air leaks using a scanning ultrasonic sensor system	IEEE Sensors Applications Symposium (SAS)	Alemanha

Fonte: Autora

Esses trabalhos trazem uma significativa contribuição, mas muito ainda pode ser investigado no que diz respeito a técnica ultrassônica de detecção de vazamentos, principalmente no que diz respeito a caracterizar os vazamentos e sua representatividade na perda de eficiência global do SAC.

2.1. ENERGIA

A energia pode ser considerada um fator de produção tão importante quanto o capital, a mão-de-obra ou a matéria-prima. As empresas estão cada vez mais preocupadas em desenvolver e a implementar programas de otimização e gestão energética, como uma solução para os problemas de consumos atuais, combate as alterações climáticas e para manter-se competitivas no mercado (Oliveira,2018)

2.1.1. Matriz Energética

A Matriz Energética é o conjunto de recursos utilizados por um país para fornecimento da energia necessária para realização de seus processos produtivos. Existem dois tipos de recursos disponíveis. Os primários são as fontes energéticas oriundas da natureza, ou seja, aquelas que não passam por processos de transformação, tais como petróleo, gás natural e carvão mineral. Os secundários são formados a partir de uma matéria-prima que sofre transformações, tais como gasolina, diesel e eletricidade.

As fontes de energia são divididas entre não renováveis e renováveis. As não renováveis são as passíveis de extinção. Dentre elas, tem-se o petróleo, o gás natural, o carvão mineral e os combustíveis nucleares.

As vantagens das não renováveis estão relacionadas com a significativa experiência adquirida na geração de energia através desses compostos e a facilidade no transporte e armazenamento. As desvantagens, além do fato das reservas serem passíveis de esgotamento e encontrarem-se principalmente em locais com política instável, como o Oriente Médio, a queima desses combustíveis gera maior quantidade de CO_2 quando comparados às fontes renováveis, agravando o efeito estufa (LAVADO, 2009).

As fontes renováveis são obtidas através de recursos naturais e repostas na natureza de forma que o consumo, em geral, não seja maior que a produção. Os principais exemplos são: hidráulica, eólica, solar, biomassa e geotérmica. A ampliação do uso de fontes renováveis ocorreu a partir de 1990 e se intensificou após o começo do século XXI, em razão do aumento da preocupação com o meio ambiente, da diminuição das reservas de combustíveis fósseis em alguns países e da constante mudança no preço do barril de petróleo (ANEEL, 2008).

O processo de diversificação da matriz, como forma de manter a segurança e autossuficiência energética de um país, tornou-se mais evidente nos últimos anos. Até 1970, apenas duas fontes, lenha e petróleo, eram responsáveis por 78% de toda a demanda brasileira (MME, 2007).

Em 2019, o cenário já apresenta uma maior pluralidade, conforme mostrado na Figura 1.

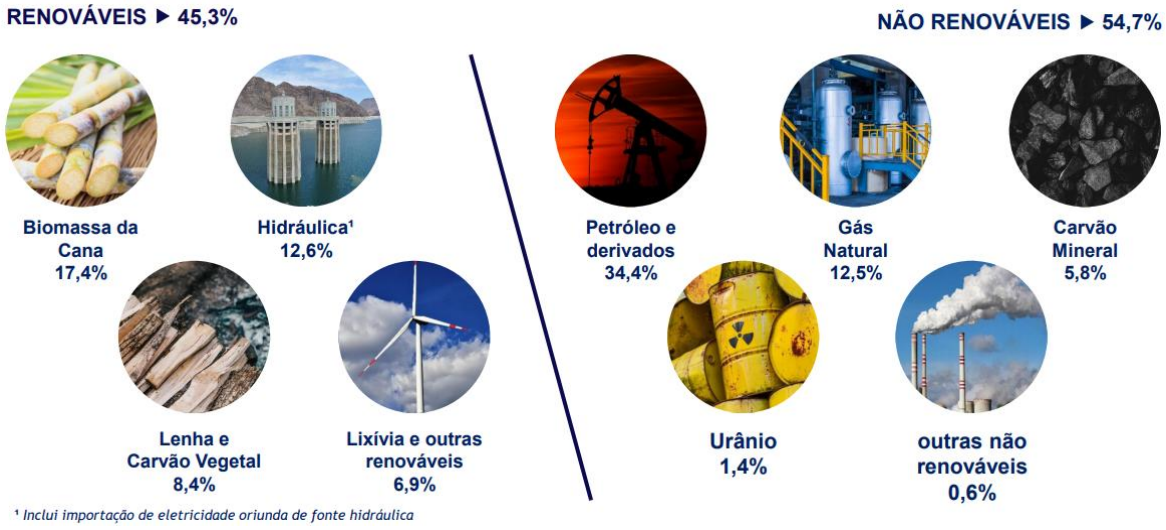


Figura 1. Matriz Energética Brasileira. Fonte: EPE (2019).

2.1.2. Matriz Elétrica

O país também pode usar como um indicador a matriz elétrica, que difere da energética por abranger apenas o uso das fontes de energia para geração de energia elétrica, enquanto a energética considera todas as destinações, como por exemplo a utilização no setor de transportes e industrial.

O Brasil vem dando passos positivos em relação às fontes renováveis na produção de eletricidade. A energia eólica, por exemplo, cresceu 14,4% em relação a 2017, e a hidráulica, 4,1%, conforme mostrado na Figura 2. Mas o maior salto foi, certamente, o da energia solar. O crescimento foi de 298%, representando a maior taxa de elevação da matriz elétrica brasileira de 2018 (EPE, 2019).

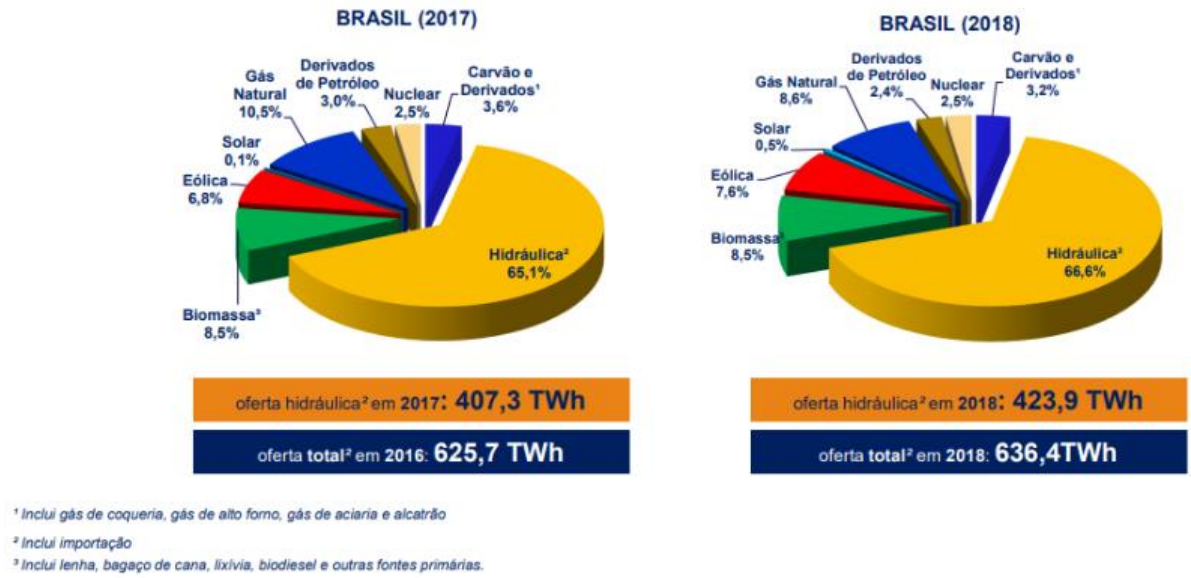


Figura 2. Matriz Elétrica Brasileira. Fonte: EPE (2019).

De acordo com dados da EPE, Figura 3, o consumo de energia elétrica no setor industrial brasileiro representa aproximadamente 37% do consumo total.

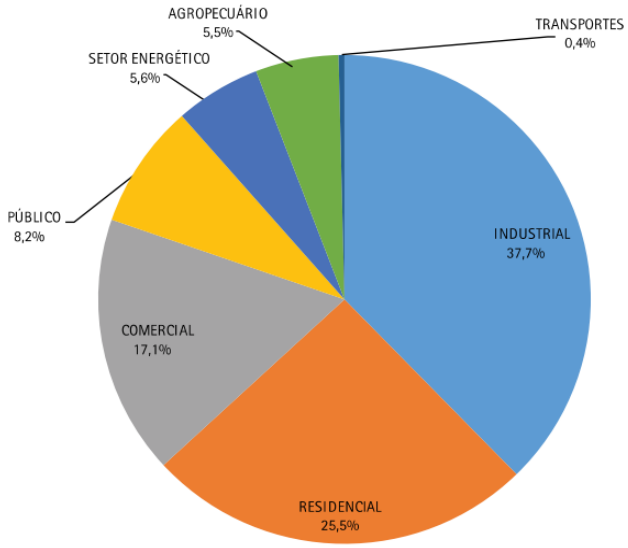


Figura 3. Participação por setor no consumo de energia elétrica. Fonte: EPE (2019).

Considerando uma melhor utilização desta energia para operação de máquinas, ventiladores e compressores, estes dados representam um grande potencial de redução de consumo.

Segundo estudos realizados na União Europeia, com o programa SAVE II, 18% da energia elétrica consumida no setor industrial é destinada a sistemas de ar comprimido e 7% para compressores de refrigeração (ALMEIDA, 2016), inferindo uma alta relevância à utilização e geração do ar comprimido (AC), e, consequentemente, a operação eficiente destes sistemas.

Na Figura 4 tem-se o consumo de energia no setor industrial brasileiro, entre os anos de 1995 e 2018, em GWh.

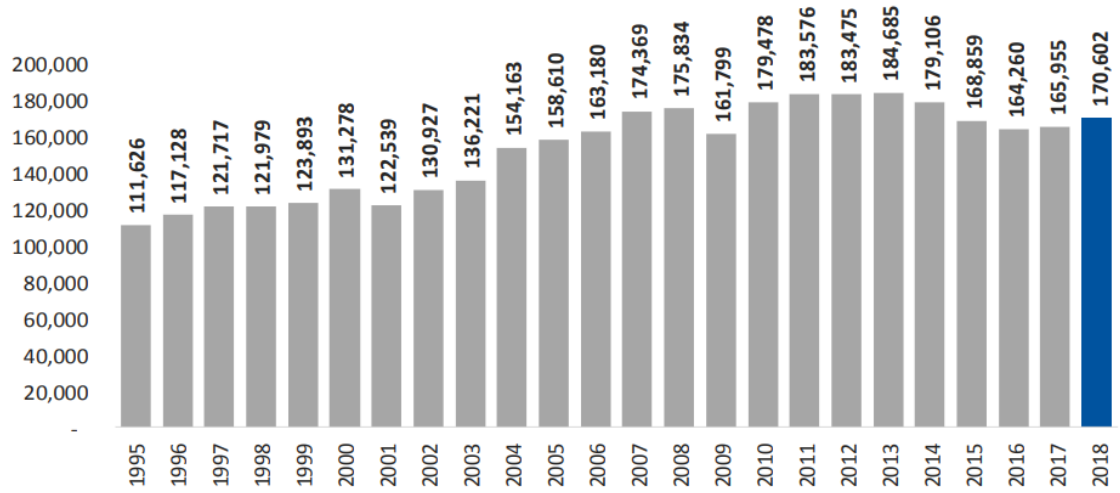


Figura 4. Consumo de energia no setor industrial. Fonte: EPE (2019).

2.1.3. Eficiência Energética

O crescimento econômico e social traz consigo qualidade de vida para as pessoas às custas de um consumo de energia cada vez maior. No Brasil, de acordo com EPE (2017) o consumo de energia elétrica vem aumentando a uma taxa média de 3,3% ao ano na última década. Atualmente, o setor industrial brasileiro detém a maior participação na demanda por energia do país, com aproximadamente 33% no consumo total de energia, e 37,6% do consumo de eletricidade (EPE, 2017).

O aumento da utilização de energia se apresenta como um grande desafio técnico e econômico para atender à crescente demanda. A eficiência energética, que consiste em usar de modo eficiente a energia para a realização de uma tarefa ou ação, bem como aumento da infraestrutura física dos sistemas elétricos, surgem como medidas para garantir o fornecimento energético futuro. Nesse contexto, a eficiência energética, principalmente em âmbito industrial, vem se tornando uma importante ferramenta para assegurar o suprimento de energia (Alves,2018).

No Brasil, existem alguns programas governamentais que vêm sendo implementados com o intuito de propagar ações de conservação de energia. Dentre esses programas, pode-se citar os seguintes: o Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE), coordenado pelo Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (INMETRO) que fornece informações sobre o desempenho dos produtos para que os consumidores realizem compras conscientes; o Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL) que promove ações de eficiência energética em diversos segmentos da economia; o Programa Nacional de Racionalização do Uso dos Derivados do Petróleo e do Gás Natural (CONPET) que fomenta a racionalização e a eficiência no consumo de derivados de petróleo e gás natural (EPE, 2016).

Dentre essas iniciativas, destaca-se o Programa de Eficiência Energética (PEE) criado através da Lei n° 9991 de 2000 regulado e gerenciado pela e Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). A ANEEL, através do PEE, determina que as concessionárias e permissionárias de distribuição de energia elétrica apliquem 0,5% de sua receita operacional líquida anual em projetos de eficiência energética de unidades consumidoras da sua área de concessão. Dessa forma, o PEE visa promover o uso eficiente da energia em equipamentos, processos e usos finais através de projetos que possuam grande potencial de redução de consumo e viabilidade econômica. Como objetivos finais, encontram-se a demanda evitada, o incentivo ao mercado de eficiência energética e a melhora dos hábitos e práticas relacionados ao consumo de energia no país (EPE, 2016).

Estudos de eficiência energética em aplicações industriais como os sistemas de ar comprimido, baseados em uma metodologia sólida e eficaz contribuem com a competitividade do setor industrial brasileiro. De modo a auxiliar no entendimento e aplicação de boas práticas nos sistemas de ar comprimido industriais.

2.2. AR COMPRIMIDO

A composição percentual que está presente no ar atmosférico varia de região para região. O gás encontrado em maior proporção no ar atmosférico é o nitrogênio, que constitui cerca de 78% de seu volume total, na proporção aproximada de uma molécula de oxigênio para cada quatro de nitrogênio, então teremos aproximadamente 21% de oxigênio. Em quantidades inferiores, cerca de 1%, são encontrados argônio, neônio, hélio, dióxido de carbono, metano, criptônio, hidrogênio, xenônio, ozônio, óxidos nitrosos e dióxido de enxofre. Além desses gases, podem estar presentes impurezas em suspensão, tais como vapor d'água e partículas de poeira ou microrganismos (Olesko, 2013).

Atualmente, cerca de 6 bilhões de toneladas de ar são comprimidas por ano em todo o planeta, gerando um consumo de 500 bilhões de kWh a um custo de 30 bilhões de dólares (Metalplan, 2017). São números que provocam um grande impacto no meio ambiente, mas que poderiam ser substancialmente reduzidos com medidas racionais.

O ar comprimido é amplamente utilizado, em pequena ou grande escala, no setor industrial, e a sua produção é diretamente proporcional ao consumo de energia elétrica. O ar comprimido é um vetor energético capaz de realizar trabalho, e pode ser utilizado em sistemas de comando, acionamento dos atuadores pneumáticos, ou mesmo em outros processos na indústria (Carvalho, 2016).

Sistemas de ar comprimido são uma das utilidades mais comuns e energeticamente intensivas empregadas na indústria, e em alguns casos específicos, torna-se a única forma de energia utilizada por suas características de segurança e confiabilidade. Possui usos em diversos segmentos industriais, mostrados na Tabela 2.

Tabela 2. Usos do ar comprimido nos setores industriais.

INDÚSTRIA	USOS DO AR COMPRIMIDO
Alimentos	Desidratação, envasamento, controles e atuadores, pulverização, limpeza, embalagem a vácuo
Automotivo	Ferramentas, estampagem, controles e atuadores, formas e transporte
Borracha e Plástico	Ferramentas de fixação, controles e atuadores, formas, injeção de molde, prensagem de molde
Cerâmica, vidro e Brita	Transporte, mistura, controles e atuadores, sopro e moldagem, resfriamento
Fabricação geral	Fixação, estampagem, ferramentas, limpeza, controles e atuadores
Madeira	Serras, içamento, fixação, tratamento com pressão, controles e atuadores
Metais: Fabricação	Estação de montagem, ferramentas, controles e atuadores, injeção de molde, pulverização
Metais: Primário	Fusão a vácuo, controles e atuadores, içamento
Moveleira	Pistola de ar, ferramentas, fixação, pulverização, controles e atuadores
Papel e Celulose	Transporte, controles e atuadores
Petróleo	Processo de compressão de gases, controles e atuadores
Química	Transporte, controles e atuadores
Têxtil	Agitação, fixação, transporte, automação, controles e atuadores, tecelagem, fiação, texturização
Vestuário	Transporte, fixação, ferramentas, controles e atuadores, equipamentos automatizados

Fonte: US DOE (2016).

No entanto, o custo da energia dessa utilidade é uma das mais elevadas da indústria, visto que o ar deve ser tratado de várias maneiras, filtrado, comprimido e resfriado antes de ser transportado e finalmente utilizado como vetor de energia. Além disso, do custo total ao longo da vida útil de um sistema de ar comprimido, o custo com energia frequentemente representa cerca de 70% a 80%, conforme mostrado na Figura 5 (Saidur, 2010).

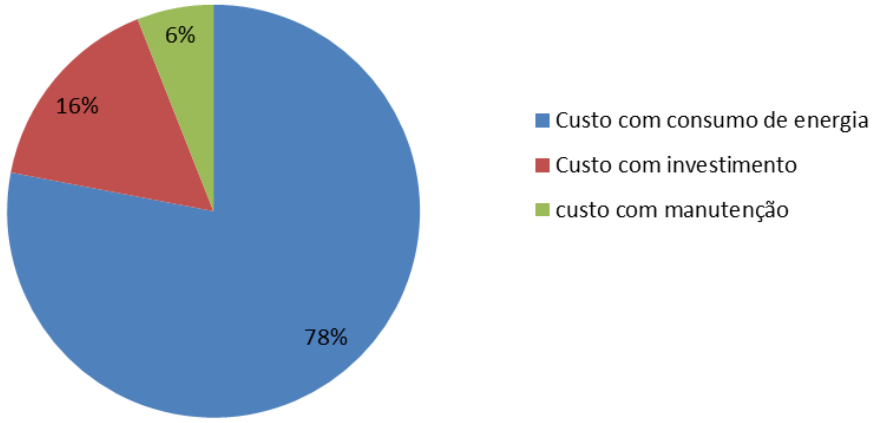


Figura 5. Custo do ciclo de vida SAC. Fonte: Saidur (2010).

Para a maioria das operações industriais os custos anuais de operação de compressores de ar apresentar uma grande parte do custo do ciclo de vida, em comparação com os custos de investimento inicial e de manutenção. De modo a minimizar estes custos devem ser consideradas melhorias de segurança, produtividade ou redução de trabalho , considerando que AC é uma forma cara de energia uma vez que apenas cerca de 19% da energia elétrica consumida é traduzida em AC. (Caruana, 2018).

Em muitas instalações de ar comprimido frequentemente há uma significante e inutilizada possibilidade de economia de energia que inclui redução da pressão de trabalho, redução dos vazamentos e otimização da operação através da correta seleção do controle, recuperação de calor, entre outras. Dessa forma, pode ser considerado um dos principais sistemas alvos ao realizar ações de eficiência energética na indústria (Atlas Copco, 2015; MOUSAVI, S. *et al.*, 2014; BENEDETTI, M *et al., 2018*).

2.2.1. Sistema de Ar Comprimido

O objetivo da instalação de um sistema de ar comprimido é fornecer ar para vários pontos de aplicação em condições de quantidade e qualidade suficientes e com pressão adequada para uma operação eficiente das ferramentas pneumáticas e outros dispositivos do ar comprimido. Antes de determinar a quantidade de ar comprimido necessária, deve ser feita uma investigação sobre todas as aplicações conhecidas e prováveis (Olesko, 2013).

Para se trabalhar eficientemente com o ar comprimido deve-se entender como é constituído todo o sistema que envolve uma planta de ar comprimido, assim como o processo industrial onde se está trabalhando.

Um sistema de ar comprimido é composto principalmente por três partes fundamentais: geração, distribuição e consumo final (Olesko, 2013).

2.2.1.1. Geração

A geração é composta pelos compressores de ar, secadores de ar e sistemas de tratamento, assim como também a própria sala de máquinas. O sistema de geração de ar comprimido pode ser centralizado (única central de compressores) ou descentralizado (vários pontos de geração de ar comprimido espalhados pela Fábrica) (Olesko, 2013).

2.2.1.1.1. Compressores

A grande maioria dos compressores industriais consistem num único equipamento que já possui incluído uma grande quantidade de componentes como: o elemento compressor; o motor elétrico; o acionamento elétrico; isolamento sonoro; entre muitos outros acessórios já integrados numa só estrutura para uma instalação mais fácil e rápida.

Os principais tipos de compressores dividem-se em dois grandes grupos, os compressores dinâmicos e os compressores volumétricos (Atlas Copco, 2016), Figura 6.

Nos compressores dinâmicos a compressão é obtida através da conversão da energia cinética em energia potencial (pressão do ar comprimido). A massa de gás é acelerada até altas velocidades num impulsor, e em seguida é forçada a desacelerar ao ser expandida no difusor. Estes compressores podem ser divididos em dois tipos de tecnologias - centrífugo ou axial. Os compressores dinâmicos centrífugos são os mais comuns e amplamente utilizados no setor industrial, enquanto os compressores dinâmicos axiais são menores e leves, quando comparados com compressores centrífugos equivalentes, conseguindo operar a velocidades muito superiores. O compressor dinâmico axial é utilizado perante a necessidade de vazões volumétricas mais elevadas e constantes (Freitas, 2017).

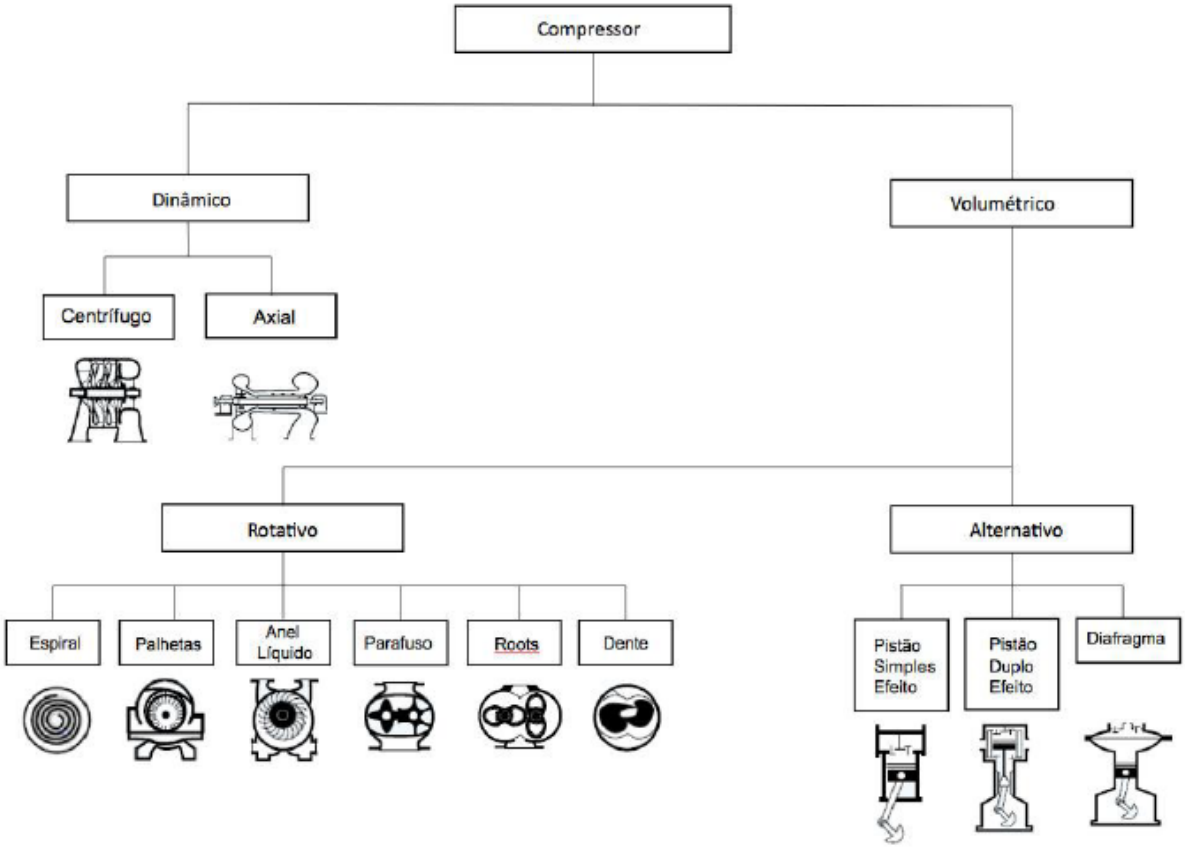


Figura 6. Compressores e respetivas tecnologias de compressão. Fonte: Atlas Copco (2016).

A compressão obtida pelos compressores volumétricos, tal como o próprio nome indica, consiste na redução de volume de gás. O gás é admitido numa ou mais câmaras de compressão, onde o seu volume é reduzido, originando consequentemente um aumento de pressão desse gás. Tal como os compressores dinâmicos, também os compressores volumétricos estão divididos em dois tipos - alternativo e rotativo (Freitas, 2017).

Um compressor volumétrico alternativo possui três tipos de tecnologias diferentes - pistão simples, pistão duplo, ou diafragma. Grandes compressores volumétricos alternativos industriais são normalmente de pistão duplo e refrigerados a água. No entanto, apesar de serem os mais eficientes de todos os tipos, são maiores, mais ruidosos e mais caros, em comparação com compressores volumétricos rotativos. Os compressores rotativos possuem a gama mais alargada do tipo de tecnologia de compressão - espiral, palhetas, anel líquido, parafuso (isento de lubrificação ou lubrificado), roots ou dentes. Devido ao facto de apresentarem baixo custo inicial, possuírem uma manutenção mais fácil, e serem

compactos, os de parafuso são o tipo de tecnologia mais comum dos compressores volumétricos rotativos, podendo ser arrefecidos a ar ou a água (Freitas, 2017).

Considerando uma velocidade de rotação constante, percebe-se que a curva característica pressão-vazão de um compressor dinâmico difere bastante da curva equivalente para compressores volumétricos, conforme mostrado na Figura 7.

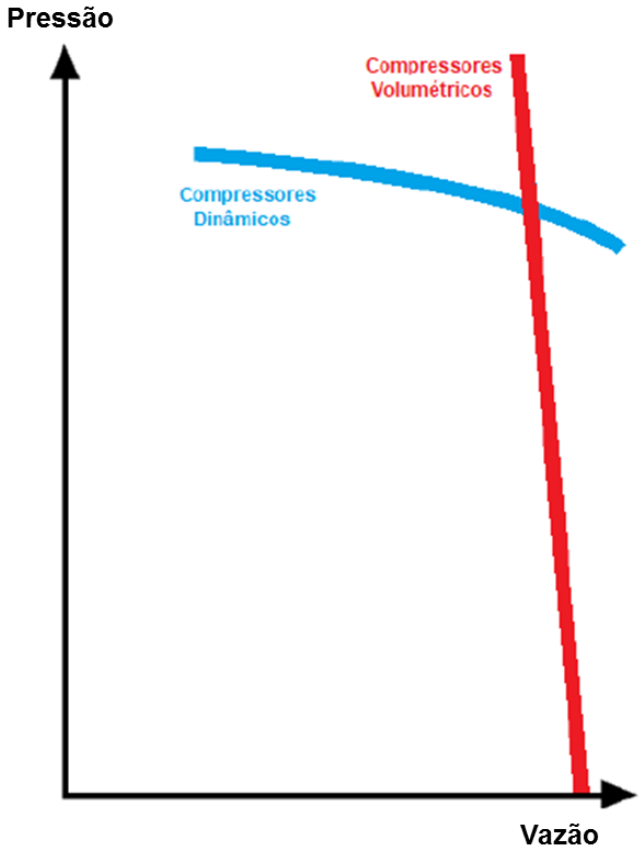


Figura 7. Curvas características pressão - vazão. Fonte: Atlascopco (2015).

Um compressor dinâmico é uma máquina com características variáveis no que diz respeito à vazão e à pressão. Por outro lado, um compressor volumétrico é uma máquina com uma vazão mais constante, mas capaz de produzir uma maior gama de níveis de pressão. Assim, enquanto os compressores volumétricos permitem obter uma maior gama de pressões mesmo a velocidade de rotação baixas, os compressores dinâmicos estão preparados apenas para instalações que necessitam de grandes e constantes vazões (Atlascopco, 2015).

Na seleção de um compressor deve-se ter em conta vários fatores de maneira a corresponder o melhor possível aos requisitos do SAC: nível de pressão adequado; vazão suficiente para satisfazer as necessidades de todos os consumidores; tipo de ar em conformidade com os requisitos dos processos de fabricação; e aquele que deverá ser de maior importância, a eficiência energética. De todos estes fatores, o mais complexo de definir é a unidade de medida de vazão, devido à existência de condições de referência distintas - *Free Air Delivery* (FAD), Normais (N), Atual (A), *Standard* (S) ou Admitido (I). Na Europa, a unidade mais utilizada para definir o ar comprimido disponível para o utilizador, é o FAD (*Free Air Delivery)*, especificado pela norma ISO 1217. Esta norma toma por referência a medição à saída do compressor, após o arrefecedor final, e as condições de admissão (temperatura de 20 °C, pressão de 1 bar e umidade relativa (UR) de 0%) (Atlascopco, 2016).

2.2.1.1.2. Qualidade do Ar

Todos os compressores, independentemente do tipo de construção, funcionam como um aspirador gigante que recolhe impurezas, concentrando-as através da compressão, conforme mostrado na Figura 8. A compressão do ar atmosférico pode levar a um aumento de 800% da concentração de contaminantes presentes (Freitas, 2017).

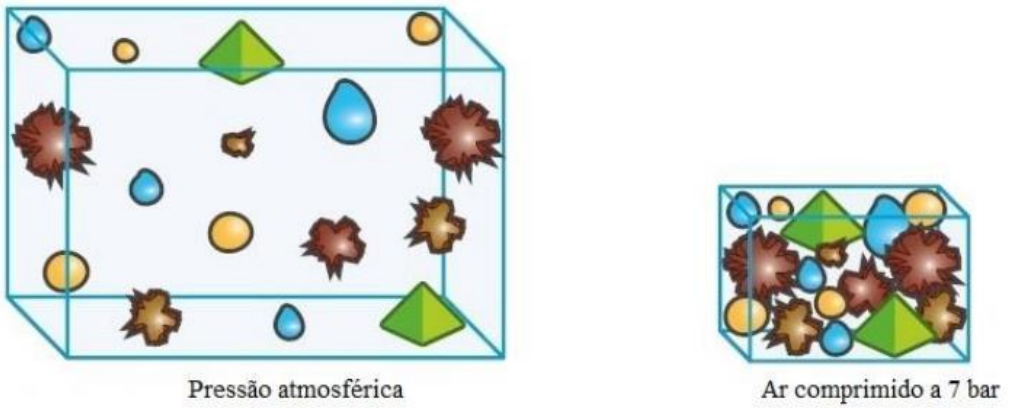


Figura 8. Concentração dos contaminantes quando o volume de ar é reduzido com a compressão. Fonte: Bosh (2008).

As normas das séries ISO 8573; ISO 12500 e ISO 7183 são relacionadas com a qualidade e teste do ar comprimido. A série ISO 8573 é a mais utilizada, em particular a ISO 8573-1:2010. Seu principal objetivo é especificar a pureza necessária de ar comprimido num ponto específico no SAC (Freitas, 2017).

O tratamento de ar comprimido em pontos isolados no sistema não é suficiente, e por isso, é altamente recomendado que este seja tratado na central de produção de ar comprimido, a um nível que satisfaça a generalidade dos utilizadores que o sistema abastece, e ao mesmo tempo, proteja a rede de distribuição. No entanto, o tratamento localizado nos pontos de utilização não deve ser descartado, permitindo assim remover contaminantes que permaneçam na rede e obter a qualidade de ar comprimido mais elevada, que é necessário, para utilizações mais críticas. Este tipo de abordagem no SAC permite garantir que o ar comprimido não é demasiado tratado e que é fornecida a melhor qualidade de ar comprimido com a solução mais rentável e eficiente (Freitas, 2017).

2.2.1.1.3. Secadores

O ar atmosférico que todos os compressores aspiram contém vapor de água. A quantidade de vapor de água está diretamente relacionada com a temperatura do ar: quanto maior a temperatura, maior será a presença de vapor de água no ar. Com a compressão do ar atmosférico, a concentração de vapor de água aumenta. Um compressor com uma pressão de trabalho de 7 bar, uma capacidade de 200 l/s, e que aspira ar atmosférico com uma temperatura de 20 °C e UR (umidade relativa) de 80%, irá libertar cerca de 10 l/h de água na rede de ar comprimido. Para evitar danos nos componentes do SAC e nos produtos, é necessário que a água resultante da condensação do vapor de água seja removida. Por conseguinte, a secagem é uma parte muito importante do processo de tratamento do ar comprimido de um SAC (Freitas, 2017).

Existem vários tipos de equipamentos secadores de ar comprimido, com diferentes características de funcionamento e valores de PDP (*Pressure Dew Point* - Ponto de Orvalho sob Pressão). Estas características, regra geral, são definidas tendo em conta parâmetros

de referência - pressão, temperatura de entrada, temperatura ambiente - para diferentes valores de PDP. A ocorrência de variações nestes parâmetros afeta o desempenho destes equipamentos e por isso, normalmente também são definidos fatores de correção pelos fabricantes (US DOE, 2016).

Segundo Freitas (2017), os tipos de secadores mais comuns são apresentados a seguir.

- **Refrigeração:** O princípio de secagem consiste num ciclo frigorífico, onde o arrefecimento do ar comprimido dá origem à condensação do vapor de água nele contido. São normalmente utilizados quando se pretendem PDP entre +2 e +10 °C e limitados a valores de 0 °C, uma vez que, abaixo deste valor, a água irá congelar e consequentemente bloquear as passagens de ar. No sentido de otimizar o processo de secagem e maximizar a eficiência, estes equipamentos utilizam o ar de saída do secador em contraciclo com o ar de entrada, evitando condensação à saída e arrefecendo o ar de entrada. Também para regimes de carga com grandes variações, existem equipamentos com tecnologia VEV (Variador Eletrônico de Velocidade).
- **Adsorção:** O processo de secagem é obtido através da passagem do ar comprimido por um material dessecante (sílica-gel, seiva molecular e alumina ativada). Estes materiais possuem um enorme poder de atração das moléculas de água, permitindo assim adsorvê-las em grande quantidade. Estes equipamentos são capazes de garantir valores de PDP (Pressure Dew Point - Ponto de Orvalho sob Pressão) extremamente baixos, entre -20 e -70 °C. Assim que o material dessecante é totalmente coberto por água, este fica em saturação, sendo por isso necessário regenerá-lo regularmente. Esta regeneração pode ser realizada de várias formas: ar de purga; ar quente; calor de compressão; ou recorrendo a ventiladores.

Ao contrário dos compressores, a seleção do tipo de secador passa pela análise e definição do PDP necessário no processo fabril, de forma a satisfazer todos os consumidores. Em aplicações onde o valor de PDP não exige que este seja inferior a +2 °C,

um secador de refrigeração poderá ser a melhor solução energeticamente eficiente, devido ao seu baixo custo inicial e à compatibilidade com a maioria das tecnologias de compressão. Sempre que a exigência do valor de PDP seja inferior a 2 °C, deve-se recorrer a secadores de adsorção. Tendo em conta a variedade deste tipo de secadores, a sua seleção está condicionada aos seguintes parâmetros: caudal de ar a tratar; mínimo valor de PDP necessário; tecnologia de compressão; e o ambiente envolvente (Atlascopco, 2016).

Relativamente à instalação do secador, existem duas possibilidades com características próprias, sendo elas, antes ou depois do reservatório de ar. A instalação antes do reservatório permite: obter ar seco no reservatório; menor ocorrência de condensação de água no reservatório; qualidade mais uniforme do ar comprimido; a permanência do valor de PDP, mesmo perante consumos excessivos de grandes volumes (Bosch, 2008).

Por outro lado, a instalação depois do reservatório permite: melhor definição da capacidade necessária no secador; o dimensionamento do secador para suprimir todo o consumo de ar comprimido, ou apenas um volume parcial necessário; volume de fluxo que atravessa o secador mais regular; redução da carga de trabalho do secador, uma vez que o ar comprimido irá arrefecer no interior do reservatório; menor quantidade de condensação a extrair (Bosch, 2008).

2.2.1.1.4. Filtros

A presença de partículas sólidas no ar é praticamente invisível, mas depois de comprimido, estas partículas tornam-se capazes de danificar, ou até mesmo destruir em alguns casos, ferramentas pneumáticas, redes de distribuição, o produto final, entre outros, e por isso a sua existência num SAC pode ser vista como uma pequena tempestade de areia. Para além das partículas sólidas, é comum a presença de óleos e hidrocarbonetos, sobretudo quando a produção de ar comprimido é realizada recorrendo a compressores lubrificados a óleo. Caso não sejam removidos, os óleos presentes no ar comprimido acarretam efeitos prejudiciais, não só para a estrutura do SAC que se torna poluente, como

também para a qualidade e acabamento dos produtos finais. Por estes motivos, assim como é necessário um equipamento para retirar a presença de água no ar, também é necessário que o SAC esteja equipado com filtros que permitam a remoção, de forma eficaz, de partículas sólidas e óleos (Freias, 2017), conforme mostrado na Figura 9.

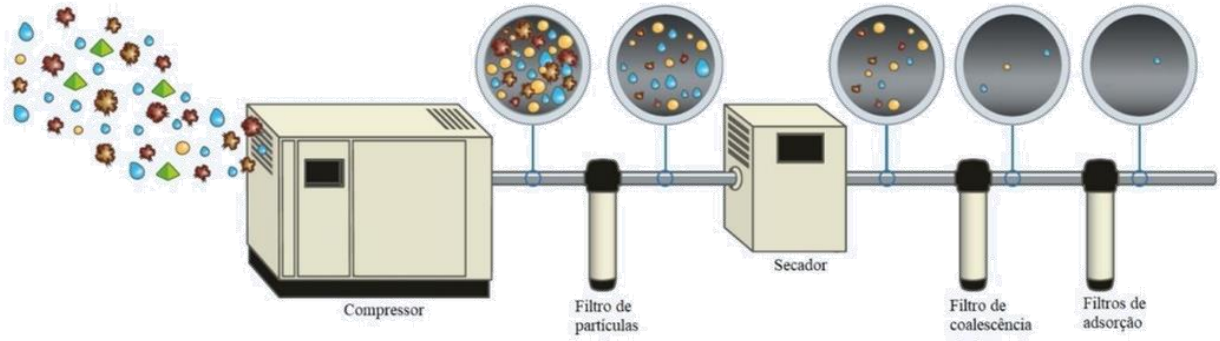


Figura 9. Exemplo de uma instalação de tratamento de ar. Fonte: Ingersoll Rand (2004).

Consoante as necessidades da qualidade do ar do SAC, normalmente são implementados dois níveis de filtragem, podendo, no entanto, ser implementados três ou até mais elementos filtrantes em aplicações especiais. Quer o primeiro, quer o segundo elemento filtrante, são utilizados para filtrar e remover partículas sólidas, umidade, óleos ou hidrocarbonetos de pequenas e grandes dimensões, respetivamente. A indústria alimentar e farmacêutica são bons exemplos, pois é necessária a existência de um terceiro elemento filtrante mais específico - os filtros de adsorção, para remover odores e paladares (Ingersoll Rand, 2010).

É importante que a filtragem corresponda sempre às necessidades da instalação. Filtros sobre dimensionados impõe quedas de pressão mais elevadas e desnecessárias, contribuindo consequentemente para o aumento da ineficiência energética do SAC. O elemento filtrante vai colmatando ao longo da sua vida útil, podendo causar problemas nas zonas de produção, contaminar o produto final, ou originar um aumento da queda de pressão nos filtros. Por estas razões, os filtros devem possuir um indicador diferencial da queda de pressão e serem revistos anualmente (Freitas, 2017).

2.2.1.1.5. Condensados

Todo o processo de compressão gera condensados, que para além de partículas de pó, contêm também hidrocarbonetos, dióxido de enxofre, cobre, chumbo, ferro entre outros possíveis elementos contaminantes. Uma vez que estes condensados são extremamente perigosos para o meio ambiente, foram estipulados regulamentos rigorosos que proíbem a condução destes resíduos para os esgotos pluviais sem um tratamento prévio. Na Alemanha, a lei sobre o regime de águas é a norma para a eliminação de condensados originados em SAC. Esta lei estipula, por setor e consoante a região, valores limite legais para todas as substâncias contaminantes e para os valores de pH. Devido também à grande influência na qualidade do ar comprimido, a segurança operacional e a rentabilidade do SAC são obrigatórias, sendo de grande importância garantir uma descarga fiável de condensados (Freitas, 2017).

A condensação da água presente no ar comprimido ocorre majoritariamente no secador, devido ao arrefecimento do ar comprimido realizado pelo circuito de refrigeração. No entanto, também pode ocorrer no compressor, nos filtros, no reservatório de ar ou na canalização, e por isso são necessárias purgas de drenagem de condensados no sistema (Freitas, 2017), conforme mostrado na Figura 10.

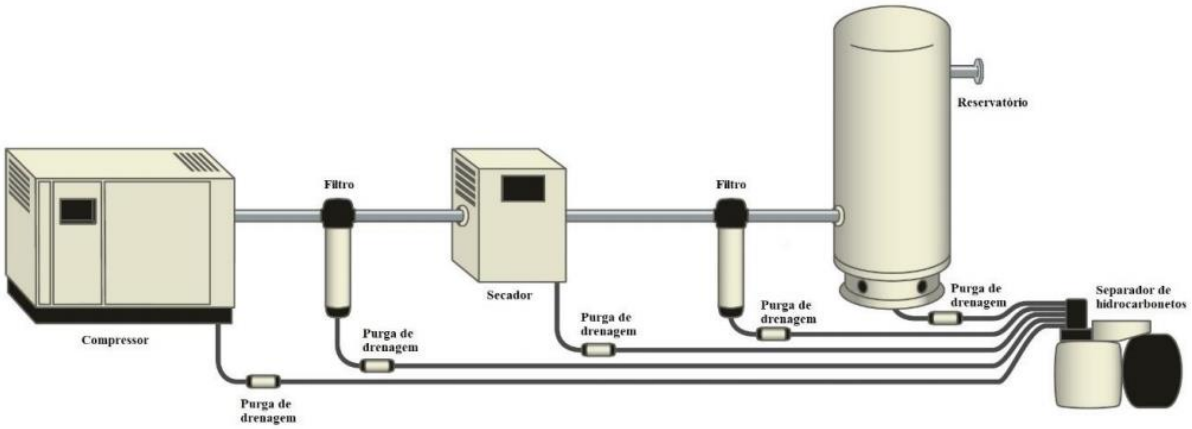


Figura 10. Sistema de recolhimento de condensados num SAC. Fonte: Ingersoll Rand (2004).

De acordo com Atlas Copco (2016) e US DOE (2016), atualmente existem quatro tipos de purgas, conforme apresentado a seguir.

• **Manual:** Não necessitam de eletricidade, nem possuem nenhum sinalizador de que o reservatório está cheio. As descargas realizadas por este tipo de purgas estão dependentes de ação humana.

• **Automática:** Possui um sistema de boia e três contatos que controlam o nível de condensado armazenado. Caso o nível de condensado não atinja o primeiro contato num determinado intervalo de tempo, a purga irá fazer automaticamente uma sequência de descargas, durante um intervalo de tempo pré-estabelecido. Quando atinge o segundo contato, realiza-se uma descarga normal para descarregar o condensado armazenado. Se o nível de condensado atingir o terceiro contato, o sistema de controle liga um alarme.

• **Temporizada:** Através de uma eletroválvula, esta purga realiza descargas regulares e temporizadas, independentemente da quantidade de condensados acumulada.

• **Eletrônica:** Semelhante ao funcionamento da purga automática, possui sensores de nível de condensados internos. Uma vez atingido um determinado nível, os condensados são descarregados através da abertura de uma eletroválvula, comandada pela unidade de controle. A descarga termina assim que o sensor detectar o nível mínimo de condensado, evitando o desperdício de ar comprimido.

As ineficiências das purgas de drenagem de condensados podem tornar-se um dos principais desperdícios de energia num SAC (Atlascopco, 2016).

2.2.1.1.6. Reservatório de Ar

Os reservatórios de ar comprimido (RAC) são elementos essenciais num SAC, tendo como principal função o armazenamento de ar comprimido e a compensação dos picos de consumo, permitindo também atenuar variações de pressão, arrefecer o ar e remover condensados (Atlas Copco, 2015).

Um RAC deverá respeitar sempre a pressão máxima de serviço no SAC e por motivos de segurança, suportar pelo menos um bar a mais do que a pressão máxima de serviço que os compressores conseguem produzir. Deve ser projetado, fabricado e testado conforme as

normas em vigor e possuir, no mínimo, um manómetro, uma purga de condensados, e uma válvula de segurança com capacidade para escoar o caudal produzido pelos compressores que o alimentam (Atlas Copco, 2015).

2.2.1.1.7. Sistema Descentralizado

A principal vantagem dos sistemas descentralizados é a flexibilidade. Em grandes fábricas com futuras instalações difíceis de serem previstas, pequenas unidades pontuais podem ser adquiridas de acordo com a necessidade, fornecendo ar conforme a demanda adicional. Outro fator também é a condição econômica, quando não se pode financiar uma instalação de grande porte, pode ser instalado um sistema de unidades múltiplas e aumentá-lo mais tarde (Olesko, 2013).

Mas mesmo em sistemas descentralizados, deve ser considerada a vantagem do agrupamento, ou seja, vários agrupamentos com pequenas máquinas, pois o custo das instalações pode ser reduzido, principalmente da água e da eletricidade. A capacidade pode ser facilitada com a interconexão de vários compressores, como também pode ser oferecida uma melhor regulagem para cargas variáveis. Desta forma um único operador pode supervisionar melhor vários compressores se estes estiverem agrupados num mesmo local. Se compressores de uma determinada marca e capacidade são mantidos como padrão dentro de um grupo, é possível manter um estoque menor de peças de reposição. Assim, algumas vantagens do sistema centralizado podem ser mantidas com o sistema de unidades múltiplas agrupadas. O intercâmbio de peças de desgaste também deve ser considerado, pois reduz custos e tempo de paradas e simplifica a estocagem de peças (Olesko, 2013).

Nos sistemas descentralizados, nos quais os compressores são distribuídos em diversas localidades da fábrica inteira, o equipamento não deve ser instalado em cantos obscuros onde pode ser facilmente esquecido. Deve-se tomar cuidado para assegurar que cada compressor tenha espaço à manutenção necessária, e para que medidas apropriadas a um atendimento regular sejam tomadas (Olesko, 2013).

2.2.1.1.8. Sistema Centralizado

O sistema centralizado de geração tem várias vantagens, como ser menos dispendiosa de operar e de manter do que vários compressores distribuídos localmente, mas o mais importante é saber onde o sistema deve ser instalado, a sala deve ser instalada em um lugar onde se tenha ar limpo e fresco para admissão.

A sala de compressores deve ser bem ventilada, pois elevadas temperaturas permitem elevadas quantidades de vapor de água no ar atmosférico, o qual é admitido no compressor. Haverá uma grande quantidade de água a ser retirada do ar comprimido, o que causará uma diminuição na eficiência energética de todo o sistema (Olesko, 2013).

O ar atmosférico, com altas temperaturas, diminui o rendimento do compressor (maior volume e maior massa de ar). Altas temperaturas, também, diminuem a vida útil do óleo lubrificante.

Necessidades intermitentes e variáveis de ar comprimido de diferentes aplicações podem ser combinadas para uma carga relativamente constante com uma capacidade total reduzida, enquanto o sistema descentralizado, um compressor isolado não pode ser utilizado para atender uma carga de pico em outro local da indústria. A água para resfriamento e a eletricidade somente são necessárias na sala central de compressores. O ruído pode ser isolado e reduzido com maior facilidade. Podem ser instalados equipamentos e controles auxiliares não justificáveis economicamente nas instalações menores de unidades múltiplas. (*Compressed Air and Gas Institute*, 2004).

Para sistemas centralizados deve ser previsto sempre um compressor reserva, para atender picos de vazão momentâneos e assumir a carga quando algum compressor principal estiver em manutenção.

Em uma instalação pode haver fontes de alto consumo de ar, mas com baixo nível de utilização. Em tais casos, o total do fluxo de ar requerido deve ser corrigido com acréscimo, a fim de evitar quedas bruscas de pressão nas linhas de distribuição. Para estes casos de alto consumo durante um breve tempo, podem-se prover tais fontes de consumo com um

sistema de ar separado, ou instalar um reservatório de ar auxiliar, que servirá de pulmão durante o alto consumo (Olesko, 2013).

O volume do reservatório deve ser 6 vezes o fluxo por segundo ou 1/10 do fluxo por minuto ou 1/600 do fluxo por hora. Ou, de uma forma mais simples, o volume do reservatório deve ter a capacidade de 10% da geração total de ar comprimido. (Atlas Copco, 2002).

2.2.1.2. Distribuição

Em um sistema industrial, o transporte do ar comprimido através de uma central ou gerações isoladas é feito através da rede de ar comprimido. A rede de distribuição de ar comprimido compreende todas as tubulações que saem do (s) compressor (es), passando pelo (s) secador (es), passando pelo reservatório, e que, unidas, levam o ar comprimido até os pontos individuais de utilização.

A rede possui duas funções básicas, conforme citado por Olesko (2013):

1. Interligar a fonte de geração com os equipamentos consumidores.

2. Funcionar como um reservatório para atender às exigências locais.

Um sistema de distribuição perfeitamente executado deve apresentar os requisitos mencionados a seguir.

- Manter a Pressão: A perda de carga provocada pela tubulação deve ser a mínima economicamente possível;

- Manter a Vazão: Os vazamentos devem ser reduzidos ao mínimo;

- Eliminar o Condensado: A umidade condensada na tubulação deve ser adequadamente eliminada do sistema.

Para que a rede de distribuição atenda a estas condições, cuidados especiais devem ser tomados com o objetivo de minimizar estes efeitos prejudiciais. Primeiramente um traçado básico da tubulação deve ser executado, analisando-se todos os pontos de utilização, com o objetivo de aperfeiçoar o sistema. Visando melhor desempenho na distribuição do ar, a definição do *layout* é importante. Uma documentação eficiente deve estar em posse do pessoal da manutenção, como por exemplo, o *layout* da rede de ar

comprimido, este deve ser construído em desenho isométrico ou escala, permitindo a obtenção do comprimento das tubulações nos diversos trechos. O *layout* apresenta a rede principal de distribuição, suas ramificações, todos os pontos de consumo, incluindo futuras aplicações, qual a pressão destes pontos, e a posição de válvulas de fechamento, moduladoras, conexões, curvaturas, separadores de condensado etc. Através do *layout*, pode-se então definir o menor percurso da tubulação, acarretando menores perdas de carga e proporcionando economia (Olesko, 2013).

Com relação ao formato da rede de ar comprimido, a mesma pode ser executada em dois tipos: circuito fechado ou circuito aberto devem-se analisar as condições favoráveis e desfavoráveis de cada uma.

2.2.1.3. Consumo Final

Outro ponto que deve ser bem analisado no sistema de ar comprimido é o consumo final ou utilização final, que representa a maior fonte de desperdícios, seja pelas instalações deficientes, ou seja, pela má utilização do ar comprimido.

As tomadas de ar comprimido devem ser sempre feitas pela parte superior da tubulação principal, para evitar os problemas de condensado. Recomenda-se ainda que não se realize a utilização direta do ar no ponto terminal do tubo de tomada. No terminal, deve-se colocar uma pequena válvula de drenagem e a utilização deve ser feita um pouco mais acima, aonde o ar, antes de ir para a máquina, passa através da unidade de condicionamento (Parker Training, 2007).

Os problemas mais encontrados na utilização final do ar comprimido, segundo Olesko (2013) são apresentados a seguir.

- Perda de capacidade de ar.
- Potência de ferramentas pneumáticas diminuída.
- Desgaste prematuro de ferramentas.
- Presença de impurezas e água na rede.

Todos estes problemas são causados principalmente pelos vazamentos, que por sua vez são os maiores causadores de quedas de pressão na rede.

2.2.2. Medidas de Economia de Energia

Um sistema de ar comprimido (SAC) é composto por quatro elementos distintos: produção, tratamento, armazenamento e distribuição, existindo entre eles uma relação de complementaridade e de forte interdependência. Neste sentido, o desempenho de um SAC depende em primeira instância do desempenho de cada elemento. Uma ineficiência num determinado ponto de o sistema poder potenciar ineficiências nos restantes, comprometendo deste modo a eficiência global do sistema (Oliveira,2018).

O objetivo de um SAC é entregar ar comprimido aos seus diferentes consumidores nas condições de vazão (mássica ou volumétrica, em função do solicitado) e pressão requeridos, com a qualidade de ar exigida dependendo da sua aplicação. Terá obviamente como pano de fundo, a preocupação energética, procurando sempre menores níveis energia para o sistema (Oliveira, 2018).

Recorrendo à noção de cadeia de eficiência, podemos representar o SAC através de um conjunto de atividades primárias e de atividades de suporte, interligadas entre si e com um objetivo comum (Oliveira, 2018), conforme mostrado na Figura 11.

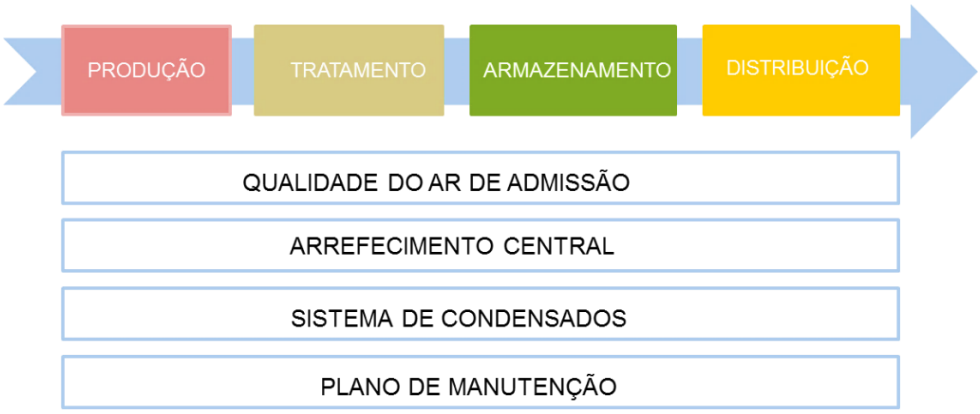


Figura 11. Cadeia do SAC. Fonte: Oliveira (2018).

Uma ineficiência num determinado elemento do sistema poder potenciar ineficiências nos restantes, condicionando e comprometendo em larga medida a eficiência global do

sistema. Existem significativas ineficiências nos SAC, podendo-se alcançar economias energéticas da ordem dos 20 - 50% com a implementação de medidas de melhoria (Oliveira, 2018).

Segundo Radgen (2000), os SAC's, na União Europeia, tem um potencial de economia entre 5 - 50%. Na Tabela 3 a hierarquia de diferentes medidas de melhoria, quantificando-as quanto à contribuição potencial de economia.

Segundo Oliveira (2018), as auditorias dão também indicação de um significativo potencial de economia energética com a aplicação de simples medidas de melhoria e recomendações para uma boa gestão deste recurso.

Tabela 3. Medidas de Melhoria em SAC.

Medidas de Economia de Energia	Ganhos[1] (%)	Aplicabilidade[2] (%)	Contribuição Potencial[3] (%)
Instalação ou Renovação do Sistema			
Melhoria dos acionamentos (substituição de motores convencionais por motores de alto rendimento)	25	2	0,5
Utilização de variadores eletrônicos de velocidade	25	15	3,8
Melhoria do compressor	30	7	2,1
Utilização de sistemas de controle sofisticados e precisos	20	12	2,4
Recuperação de calor para outras utilizações	20	20	4,0
Melhoria dos sistemas de arrefecimento, secagem e filtragem	10	5	0,5
Concepção geral do sistema, incluindo sistemas multipressão	50	9	4,5
Redução das perdas de carga	50	3	1,5
Otimização dos equipamentos utilizadores finais de ar comprimido	5	40	2,0
Operação e Manutenção do Sistema			
Redução das fugas de ar comprimido	80	20	16,0
Maior frequência na substituição dos filtros	40	2	0,8

(1) % de economia do consumo energético anual

(2) % de sistemas em que a medida é aplicável e viável economicamente

(3) Contribuição potencial (%) = Ganhos (%) x Aplicabilidade (%)

Fonte: Radgen (2000).

A seguir, segundo Oliveira (2018), tem-se as medidas de melhoria e recomendações para uma boa gestão deste recurso.

- Desligar o compressor nos períodos de parada das atividades.

- Produzir o ar comprimido a uma pressão mínima de trabalho, uma vez que os consumos energéticos aumentam quase proporcionalmente com a pressão.

- Escolher uma compressor de ar corretamente dimensionado para as necessidades do processo.

- Garantir que o ar aspirado pelo compressor é limpo e frio.

- Os compressores são equipamentos, que por natureza, tem uma baixa eficiência, apenas 4-5% da energia elétrica consumida é "transformada" em energia "útil". O restante é essencialmente para refrigeração do equipamento. Em grandes equipamentos a refrigeração é feita com água. O ar quente e água quente podem ser utilizados em processos secundários.

- A manutenção periódica do compressor é também essencial para um funcionamento perto dos valores de fábrica.

- A eliminação de todos os vazamentos detectáveis é imprescindível para a redução do consumo energético.

- Evitar curvas e outros no traçado da rede.

- Adotar uma inclinação apropriada, que permita o escoamento da água condensada na tubulação e instalar purgadores, nos pontos mais baixos da rede, e verificar, regularmente, o correto funcionamento destes dispositivos.

- Remover, ou isolar convenientemente com válvula (ou tampão), eventuais pontos da rede de distribuição, que deixaram de ser utilizados.

- Se na instalação existirem determinados setores, com um regime de trabalho inferior ao que se regista nas demais áreas da fábrica, dever-se-ão instalar válvulas, que permitam isolar a rede de distribuição de ar daquelas zonas, nos seus períodos de parada.

- Evitar redes de distribuição demasiadamente longas; em muitos casos, quando é necessário alimentar com ar comprimidos locais bastante afastados, a solução mais

económica consiste em adotar uma produção de ar descentralizada, isto é, instalar compressores menores junto às áreas de consumo, em detrimento duma única unidade, de grande capacidade, para toda a instalação.

- Verificar regularmente, o correto funcionamento dos equipamentos e ferramentas pneumáticas, e cumprir os prazos de manutenção recomendados.

- Regular a pressão de trabalho em função da utilização; o recurso a eventuais válvulas redutoras de pressão, localizadas junto dos utilizadores, traduz-se sempre por uma economia de energia, a par duma melhoria na segurança de manuseio.

- Instalar eletroválvulas nos principais equipamentos consumidores de ar, de forma a isolá-los convenientemente, quando os mesmos se encontram fora de serviço.

- Caso existam na instalação, operações que exijam grandes vazões de ar instantâneo (tipo descarga), de forma descontínua, instalar junto a estes consumidores, depósitos de ar (com uma capacidade adequada à operação) dotados de válvula de enchimento lento. Esta solução tem inúmeras vantagens, como: evitar o sobre dimensionamento dos compressores, reduzir as perdas de carga, evitar flutuações indesejáveis de pressão na rede de ar etc.

- Procurar analisar se a utilização do ar comprimido se justifica em todas as situações, isto é, se não há outras "formas de energia", de menor custo, igualmente aplicáveis a determinada operação; a título de exemplo, refere-se ao caso das operações de sopragem em que, muitas vezes, é possível recorrer a um simples ventilador de alta pressão, em substituição do ar comprimido, opção bastante económica.

A seguir, tem-se algumas das medidas de eficiência energética que serão, segundo Oliveira, 2018, possíveis de implementar num SAC.

1. Via Racionalização do Consumo

• **Redução do Índice de Fugas:** Plano de Redução de Fugas; Purgas sem perda de ar e Isolar equipamentos nos períodos de não produção

• **Redução de Vazões Desreguladas:** Instalação de reguladores de pressão

• **Eliminar Usos Inapropriados:** Sopro de limpeza; Sopro de secagem; Sopro de arrefecimento; Transporte de substâncias e Agitação de meios.

2. Via Otimização do Sistema (Aumento da Eficiência)

• **Produção:** Compressores Ajustados ao Consumo; Potência Específica do Compressor; Tipo de Regulação; Sistema de gestão Centralizado; Redução da pressão de descarga e Recuperação de energia.

• **Tratamento:** O exigível face aos requisitos de qualidade de ar.

• **Armazenamento:** Garantia de capacidade de armazenamento.

• **Rede de Distribuição:** Tipologia (Traçado da Rede) e Geometria (Secção e Singularidades).

2.2.2.1. Redução dos Vazamentos

É bastante comum nas instalações de ar comprimido das plantas industriais não haver verificação e manutenção periódica das linhas de distribuição, por considerar perda de tempo parar a instalação para fazer a manutenção. Os vazamentos existentes, geralmente do conhecimento de todos, são negligenciados. Porém, estes podem assumir proporções muito significativas relativamente ao consumo de energia elétrica e, consequentemente, no custo final do ar comprimido (Eficiência energética em sistemas de ar comprimido).

Vazamentos nas plantas de ar comprimido podem representar uma significativa perda de energia, em alguns casos de 20% a 30% (US DOE, 2016).

As fugas podem aparecer devido a vários defeitos no interior da peça e ou em áreas de ligação conforme apresentado a seguir.

- Conexões fixas por soldas ou colagem, especialmente transições entre diferentes materiais.
- Poros e fissuras capilares, devido a fadiga mecânico ou térmica (o que até certo ponto estão sempre presente e, por conseguinte, devem ser suficientemente pequenos em tamanho e número a não causar perturbação).
- Conexões flangeadas.
- Frio / calor, fugas que se abrem a temperaturas extremas, muitas vezes sendo reversível.

- Permeação, isto é, a porosidade natural do material.

A título de informação, na Tabela 4 tem-se a correlação entre a potência perdida em vazamentos e a vazão, considerando um sistema operacional a 6 bar.

Tabela 4. Perdas de vazão e potência com vazamentos.

DIÂMETRO DO FURO DE VAZAMENTO	ESCAPE DE AR EM m^3/min (à pressão de 6 bar)	POTENCIA (KW) PARA SUPRIR A COMPENSAÇÃO PERDIDA
1 mm	0,065	0,46
2 mm	0,257	1,80
4 mm	1,03	7,21
6 mm	2,31	16,17

Fonte: Oliveira (2018).

Um plano de manutenção eficaz, com inspeção periódica aos vazamentos deve manter as perdas por vazamento entre 5% a 10% (US DOE, 2016).

A quantificação de vazamentos é possível com vários métodos conhecidos. Eles são com base principalmente na medição do tempo de operação do compressor, embora medidores de vazão, detectores de ultrassom e termografia por infravermelho (IR) também estejam se consolidando (ŠEŠLIJA *et al,* 2016) .

A detecção de vazamentos ultrassônicos é provavelmente a forma mais versátil de detecção de vazamentos em linhas de ar comprimido. Devido suas características, é prontamente adaptável a uma variedade de situações para detecção de vazamentos ultrassônicos (ŠEŠLIJA *et al.,* 2016)

As vantagens da detecção através de equipamentos ultrassônicos incluem a versatilidade, velocidade, facilidade de uso, a possibilidade de efetuar testes durante as medições e a capacidade de medições em um vasto limite de vazamentos.

Posteriormente serão apresentados o princípio de funcionamento do equipamento bem como a metodologia de inspeção através da Técnica Ultrassônica.

2.3. MANUTENÇÃO

A manutenção tem passado por significativas mudanças, isso é devido a um aumento rápido do número e diversidade de itens físicos em instalações, equipamentos e edificações que devem ser mantidos (Xavier e Pinto, 2019).

Outro fator são os projetos cada vez mais complexos, exigindo novas técnicas, novo enfoque na estruturação e organização da manutenção. A mão de obra da manutenção exige uma nova postura de sua equipe, que inclui uma crescente conscientização de quando uma falha de equipamento afeta a segurança ou o meio ambiente, maior conscientização da relação entre manutenção e qualidade do produto (Baldissarelli, 2019).

A cobrança pelo aumento da disponibilidade e confiabilidade dos equipamentos e redução de custos é cada vez maior. Tais alterações exigem novas atitudes e habilidades de todo corpo da manutenção (Xavier e Pinto, 2019). Na Figura 12 tem-se a evolução do desempenho da manutenção.



Figura 12. A evolução do desempenho da manutenção. Fonte: Baldissarelli (2019).

Os custos de manutenção (5-10% dos custos dos investimentos em máquinas) são bastante reduzidos em relação a outros custos. Podem, ainda, ser mais reduzidos se a manutenção for planejada. A escolha de uma manutenção eficiente vai definir a

confiabilidade e a performance do sistema. A escolha qualitativa dos equipamentos que constituirão o sistema é fator importante.

Em sistemas de ar comprido, a manutenção é afetada pelo tipo de compressor, equipamentos auxiliares (filtro, secadores etc.), situação da operação, condições da instalação, qualidade do meio, planejamento da manutenção, escolha do nível de segurança, sistema de resfriamento e recuperação de energia térmica e grau de utilização.

Uma manutenção corretiva planejada, fruto da manutenção preditiva, torna os custos previsíveis e aumenta a vida útil e confiabilidade dos equipamentos. Os custos de reparos são menores e os tempos de máquina parada são mínimos. O uso da eletrônica embarcada nos equipamentos facilitou a realização de diagnóstico durante a operação do sistema, e isto otimiza a intervenção da manutenção.

A necessidade do recondicionamento de qualquer unidade poderá ser detectada muito antes de acontecer, podendo ser programada, reduzindo o tempo de parada e aumentando a disponibilidade da planta. Ter disponível, para a realização da manutenção, técnicos devidamente capacitados e uso de peças genuínas torna o sistema mais eficaz e mais confiável. (Eficiência energética em sistemas de ar comprimido).

2.3.1. Manutenção Preditiva

A Manutenção Preditiva, também conhecida por Manutenção sob Condição, ou Manutenção com Base no Estado do Equipamento, ou Manutenção Proativa, é definida, por Xavier e Pinto (2019):

> *"É a atuação realizada com base na modificação de parâmetros de condição ou desempenho, cujo acompanhamento obedece a uma sistemática. Através de técnicas preditivas é feito o monitoramento da condição e a ação de correção, quando necessária, é realizada através de uma manutenção corretiva planejada."*

A manutenção preditiva é a primeira grande quebra de paradigma na manutenção e tanto mais se intensifica quanto mais o conhecimento tecnológico desenvolve equipamentos

que permitam avaliação confiável das instalações e sistemas operacionais em funcionamento (Xavier e Pinto, 2019).

Seu objetivo é prevenir falhas nos equipamentos ou sistemas através de acompanhamento de parâmetros diversos, permitindo a operação contínua do equipamento pelo maior tempo possível. Na realidade, o termo associado a Manutenção Preditiva é o de predizer as condições dos equipamentos. Ou seja, a manutenção preditiva privilegia a disponibilidade â medida que não promove a intervenção nos equipamentos ou sistemas, pois as verificações são efetuadas com o equipamento produzindo (Xavier e Pinto, 2012).

Quando o grau de degradação se aproxima ou atinge o limite previamente estabelecido, é tomada a decisão de intervenção. Normalmente esse tipo de acompanhamento permite a preparação previa do serviço, além de outras decisões e alternativas relacionadas com a produção.

A redução de acidentes por falhas catastróficas em equipamentos é significativa. Também a ocorrência de falhas não esperadas fica extremamente reduzida, o que proporciona, além do aumento da segurança pessoal e da instalação, redução de paradas inesperadas da produção, que dependendo de tipo de planta, implica em consideráveis prejuízos (Xavier e Pinto, 2019).

2.3.1.1.Inspeções de vazamentos no contexto da Manutenção

A inspeção de vazamento de ar comprimido pode ser vista tanto como uma atividade de manutenção preditiva, como também, uma ferramenta para a gestão dos ativos das organizações.

Os vazamentos de ar comprimido podem ser considerados defeitos nos sistemas ou máquinas pneumáticas, os quais podem ocasionar a falhas nestes sistemas ou equipamentos. Se as manutenções das redes de ar comprimido forem realizadas somente com bases em intervalos de tempo pré-definidos (manutenção preventiva) e os vazamentos não forem inspecionados regularmente, pode acontecer de existirem vazamentos não observados, gerando um defeito (Almeida, 2016).

Entretanto, se forem efetuadas medições regulares na rede de ar comprimido através de detector de vazamento ultrassônico (manutenção preditiva) e, desta forma, verificado a perda de pressão na rede ou a vazão de ar comprimido desperdiçado, os defeitos podem ser transformados em números e, desta forma, gerenciados.

Neste contexto, a inspeção de vazamentos de ar comprimido pode ser considerada uma técnica de manutenção preditiva.

2.3.1.2 Gestão de ativos

Conforme descrito na norma ABNT NBR ISO 55000:

> *A gestão de ativos envolve o equilíbrio de custos, oportunidades e riscos contra o desempenho desejado dos ativos, para alcançar os objetivos organizacionais. Pode ser necessário considerar este equilíbrio em diferentes escalas de tempo.*

Ou seja, do ponto de vista da abordagem da gestão de ativos, é fundamental que se leve em consideração os custos nas diversas etapas do ciclo de vida dos ativos, incluindo as fases de operação e manutenção. Esta nova abordagem preconiza que o item deve ser medido, avaliado, mantido e descartado quando os seus padrões já não mais atendem as necessidades da organização (Almeida, 2016).

Neste contexto, a inspeção de vazamentos de ar comprimido pode ser considerada como uma ferramenta para se minimizar os custos da operação e manutenção dos sistemas de geração, distribuição e utilização de ar comprimido, contribuindo assim para os objetivos da gestão de ativos.

2.3.2. .Principais Técnicas de Manutenção Preditiva

A atividade de manutenção preditiva é uma função estratégica dentro de uma organização, fundamentada na necessidade de intervenção com base no estado dos equipamentos.

Os anseios por uma planta capaz de produzir cada vez mais, com um menor custo e uma maior confiabilidade de seus equipamentos, originaram exigências prioritárias sobre a forma de manter os processos industriais, motivando o surgimento de técnicas de manutenção preditiva capazes de avaliar o estado do equipamento através de medição, acompanhamento e/ou monitoramento de parâmetros. Essas técnicas são importantes para evitar a quebra, buscar o melhor desempenho e aproveitar ao máximo a vida útil dos equipamentos.

A periocidade de medição deve ser ajustada em intervalos de tempo adequados ao estado de vida da máquina e durante a fase inicial da implementação do programa de manutenção preditiva, como por exemplo a curva da banheira, Figura 13. Essa curva indica os períodos críticos de falhas e de funcionamento sem falhas geral de um equipamento. Indica, que no início de vida de uma máquina as falhas são elevadas, diminuindo com a vida da máquina. Na fase final de vida da máquina verifica-se um aumento exponencial de falhas com o avançar do tempo. As medidas corretivas são, portanto, aplicadas no final de vida do órgão/equipamento.

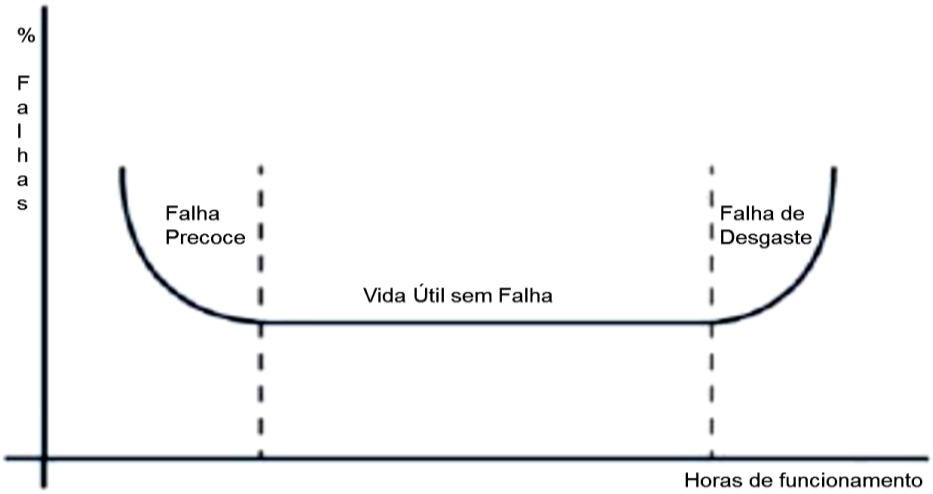


Figura 13. Curva característica da vida do equipamento. Fonte: Adaptado de Xavier e Pinto (2012).

Como já visto anteriormente, a técnica preditiva indica a necessidade de intervenção com base no estado atual do equipamento. Essa avaliação pode ser feita através de medição, acompanhamento ou monitoramento de parâmetros.

Para Xavier e Pinto (2019), esse acompanhamento pode ser feito de três formas, conforme apresentado a seguir.

1) **Subjetivo:** Essa técnica depende muito da mão de obra qualificada do manutenedor, onde através dos sentidos, visão, audição, tato, olfato detectam alguma anormalidade no equipamento.
2) **Objetivo:** É realizado ou acompanhado com base em medições utilizando equipamentos ou instrumentos especiais. Esses dão resultados que são arquivados e comparados com parâmetros base, ou histórico do equipamento que definem a ação a ser tomada pela manutenção.
3) **Contínuo:** É técnica usada para monitoramento de defeitos ou falhas geralmente em equipamentos de alta responsabilidade. Usualmente vem associado a dispositivos que tomam alguma ação, interagem com o operador ou responsável técnico, uma vez atingido o valor limite estipulado. Com o desenvolvimento da eletrônica e de sistemas digitais a oferta de sistemas de monitoração cresceu muito e consequentemente o leque de aplicações, com isso também houve a redução do custo desses sistemas. Assim, é possível a monitoração de variáveis típicas de processos como densidade, vazão, pressão, temperatura, vibração etc.

Existem uma variedade de tecnologias que suportam os programas de manutenção preditiva. Geralmente a monitorização de vibrações é tida como a chave dos programas de manutenção preditiva, podendo estar conjugada com outras tecnologias e técnicas de aquisição de diferentes parâmetros aplicados.

Além da Análise de Vibração destacam-se: Análise Termográfica, Análise Ferrográfica, Análise Ultrassônica, Análise de Óleo Lubrificante e Isolante, Ensaios Não Destrutivos (Líquidos Penetrantes, Partículas Magnéticas, Correntes Parasitas etc.).

2.4. ULTRASSOM

A detecção de vazamento de ar percorreu um longo caminho nos últimos anos, desde a verificação de vazamentos com um pano ensaboado, até hoje, onde o ultrassom é um

método confiável de detectar vazamentos. A detecção de vazamento de ultrassom em sua a forma mais básica envolve um inspetor andando em uma planta industrial, detectando vazamentos e identificando-os para posterior correção.

Um programa completo de gerenciamento de vazamentos identifica a localização de um vazamento, quantifica-o com base no nível de ultrassom, observa a acessibilidade do vazamento, o tempo que levará para consertar, a urgência e a data em que foi identificada.

Os instrumentos atualmente disponíveis no mercado para a detecção de vazamentos de ar comprimido utilizando ultrassom possuem todos, basicamente, a mesma tecnologia e princípios, sendo poucas as variações construtivas.

Nas Figuras 14 a 17 tem-se alguns tipos de detectores de vazamento ultrassônicos.



Figura 14. Detectores Ultrassônicos Digitais **(a)** Leakshooter LKS1000-V3. Fonte: https://www.amazon.co.uk/Air-Gas-Vacuum-Steam-Detector/dp/B00FIMFK78. **(b)** Testo Sensör LD - Ultrasonik kaçak dedektörü. Fonte: https://www.tekno-test.com/urun-kategori/basinc/basincli-hava-kacak-dedektoru/.



Figura 155. Detector Ultrassônico Inspector 400 - CMIN 400. Fonte: https://www.tequipment.net/SKF/CMIN-400-K/Ultrasonic-Leak-Detectors/.



Figura 16. Detectores de Vazamentos Ultrassônicos **(a)** Detector de vazamento de ar comprimido compacto. Fonte: https://www.directindustry.com/pt/prod/sdt-ultrasound-solutions/product-30375-1937113.html. **(b)** Detector de vazamento de ar comprimido com visor digital sdt200. Fonte: https://www.directindustry.com/pt/prod/sdt-ultrasound-solutions/product-30375-984359.html.



Figura 17. *Kit* do Detector Ultrassônico JORC. Fonte: http://www.sgspartners.com.br/pdf/locator_pdf5.pdf.

2.4.1. Princípio de Funcionamento

O esquema do princípio de funcionamento do detector de vazamento ultrassônico é mostrado na Figura 18.

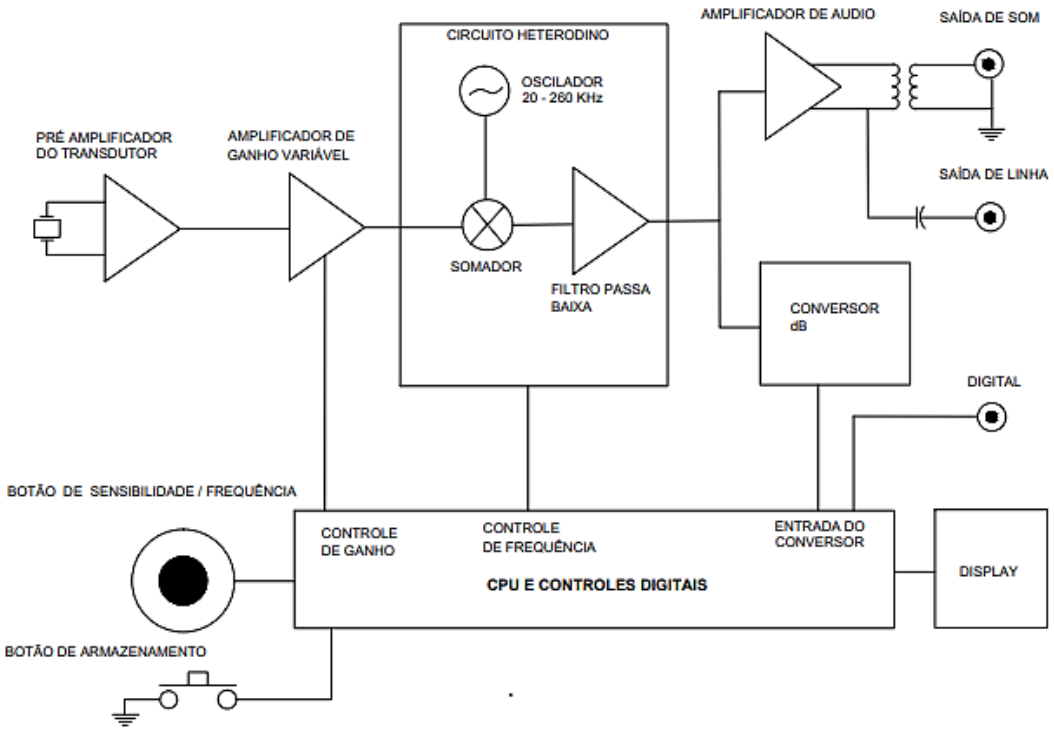


Figura 18. Princípio funcionamento Detector de Vazamento Ultrassônico. Fonte: UE Systems (2007).

Um transdutor converte energia de uma forma para outra. Embora o mesmo transdutor possa ser usado para enviar ou receber ultrassom, no caso da detecção de ruído ultrassônico, o objetivo do transdutor é receber ultrassons e não os transmitir. O processo de recepção do ultrassom propagado no ar envolve o uso de transdutores piezelétricos.

O ultrassom recebido coloca pressão sobre o transdutor e faz o transdutor gerar energia elétrica. O som é amplificado e, em seguida, heterodinado. Isso torna possível a utilização de instrumentos de ultrassom com aparelhos de gravação, medidores de vibração ou computadores portáteis. Os medidores de vibração e computadores não aceitam sinais de ultrassom cruzados, assim o sinal deve ser demodulado (UE SYSTEMS).

O cristal sob pressão desenvolve uma carga elétrica. O ultrassom que colide no cristal faz com que ele se flexione e produz energia elétrica. Os três materiais de cristal transdutor utilizados normalmente são quartzo, sulfato de lítio e cerâmicas polarizadas (UE SYSTEMS).

Transdutores piezelétricos geram cargas elétricas quando submetidos às vibrações mecânicas e, inversamente, para gerar vibrações mecânicas quanto submetidos a impulsos elétricos. Transdutores piezelétricos podem ser feitos de titanato de sódio bismuto, metaniobate de chumbo e materiais a base de titanato zirconato de chumbo. Esses materiais cerâmicos são sintetizados (pressionados) e aquecidos a cerca de 1000°C e polarizados aplicando uma tensão direta de alguns milhares de volts por centímetro de espessura. O processo de polarização faz com que esses materiais cerâmicos sejam piezelétricos (UE SYSTEMS).

Há quatro frequências de saída resultantes da mistura: a frequência do sinal do vazamento ultrassônico original; frequência do sinal oscilador original; soma dessas duas frequências, a diferença ente as duas frequências do sinal original (UE SYSTEMS).

O princípio heteródino é usado para converter as frequências ultrassônicas até o nível sonoro adequado para humanos discernirem. No processo heteródino, o sinal de áudio é uma tradução direta do sinal original. Utiliza-se o mesmo princípio heteródino para utilizado em transmissão de rádio AM e recepção. Portanto, o sinal de saída de fone de ouvido não é um sinal dividido, onde pode-se multiplicar a frequência de áudio por um número e acabar com a frequência ultrassônica. No processo heteródino, o sinal de entrada ultrassônica é misturado com um sinal do oscilador interno, a diferença é amplificada e enviada para a saída dos fones de ouvido e do circuito medidor (UE SYSTEMS).

O ultrassom é detectado pelos cristais recebidos e amplificados pelo pré amplificador localizado na caixa do sensor removível. Ele é amplificado ainda mais dentro do instrumento por um amplificador de ganho variável para permitir uma ampla gama dinâmica de sinal. O sinal é então heterodinado ou traduzido para um sinal sonoro. A frequência do oscilador de circuito heterodinado é ajustada pelo CPU, de modo que as frequências especificas possam ser monitoradas ou o ultrassom concorrente possa ser eliminado (UE SYSTEMS).

Esse ajuste é feito com o mostrar da sensibilidade/frequência que é um codificador para a CPU. O sinal heterodinado é então roteado para o amplificador de áudio para conduzir os fones de ouvido e uma saída condicionada apropriada para o processamento de

sinais adicionais, tais como análise espectral. Também é encaminhado para um conversor de dB para linearizar o sinal para digitalização na CPU. A amplitude do sinal é exibida em decibéis ou por um gráfico de barras (UE SYSTEMS).

2.4.1.1. Fatores que Influenciam no Ultrassom Gerado

Existem vários fatores que tornam um vazamento detectável usando ultrassons. Destes, o único fator que deve estar presente é a turbulência, pois é isso que gera o ultrassom. Forma do orifício, diferencial de pressão e condições atmosféricas afetarão o nível de turbulência, enquanto ultrassons concorrentes, distância do vazamento e acessibilidade ao vazamento são fatores externos que podem afetar o nível de ultrassom medido por um detector de vazamento ultrassônico. Esses fatores afetam o nível de ultrassom medido, em graus variados.

Condições atmosféricas na maioria das circunstâncias terão um impacto mínimo no nível de dB medido com a exceção de estar em altitude, onde a densidade do ar é menor.

A acessibilidade ao vazamento pode ser um fator importante na medição de ultrassom, como incapacidade de se chegar próximo de um vazamento, tem impacto na estimativa precisa do nível de dB. Para que qualquer processo de caracterização de vazamentos seja preciso, a distância do vazamento, e a direcionalidade do ultrassom devem ser claramente entendido pelo inspetor para assegurar que avaliações e ajustes apropriados sejam feitos. Devido aos níveis de atenuação relativamente altos do ultrassom, a distância do vazamento é um fator importante na detecção de vazamentos. Com uma aproximação, a lei de distância inversa dá uma redução de 6 dB para cada duplicação da distância para o som audível.

Quando a medição de vazamento está sendo conduzida, é a turbulência que cria o ultrassom medido pelo detector de vazamento ultrassônico, no entanto a turbulência é produto de dois os outros fatores: a pressão e orifício.

Existe um diferencial de pressão presente em todos os vazamentos, é esse diferencial de pressão que cria a turbulência no local do vazamento como cada lado do vazamento

tenta equalizar com o outro. Presume-se atualmente que para qualquer vazamento dado, quanto maior o diferencial de pressão, maior a turbulência e maior o nível de dB.

A forma do orifício, incluindo o tamanho, de qualquer vazamento terá um efeito significativo na nível de ultrassom gerado, se tem uma borda lisa ou uma borda áspera, circular ou uma seção transversal quadrada, se estiver em um flange ou encaixe, ou se for uma pequena alfinetada ou buraco aberto, todas essas variáveis afetarão o nível de ultrassom gerado pelo vazamento. Este fator desempenha um papel significativo no nível de ultrassom a ser medido em locais de vazamento. (Wolstencroft, 2008).

2.4.1.1.1. Medições Experimentais

A fim de compreender melhor quais são as principais influências nas inspeções de vazamentos de ar comprimido com ultrassom, Wolstencroft (2008) realizou uma série de experimentos de vazamentos / escoamentos de ar comprimido com condições controladas.

Com relação à direcionalidade, Wolstencroft (2008) recomenda que, sempre que possível, devem-se realizar medições em diversas direções a fim de se medir e registrar o maior valor possível da intensidade de ultrassom. Caso não for possível medir em realizar a medição em diversos ângulos, recomenda a aplicação de fatores de correção apresentados no trabalho.

Outro grande fator de influência observado por Wolstencroft (2008) é a distância de medição, entre o detector e a fonte de vazamento. Como resultado, concluiu-se que, para distâncias superiores a 0,4 m, as leituras apresentaram flutuações / baixa repetibilidade, sendo que o trabalho recomenda padronizar as inspeções em campo utilizando a distância de 15 cm. Caso esta distância não puder ser medida, o trabalho fornece alguns coeficientes de correção.

2.4.2. Metodologia de INSPEÇÃO

A metodologia de inspeção, com base em recomendações dos fabricantes dos detectores de ultrassom é dividida em três etapas, conforme apresentado a seguir.

2.4.2.1. Pré-identificação e Correção dos Vazamentos Audíveis

O primeiro passo, antes de iniciar as inspeções com o detector de ultrassom, é caminhar pela planta e identificar os vazamentos audíveis, ou seja, os que não necessitam de auxílio de um detector de ultrassom para serem identificados. Estes vazamentos devem ser registrados e reparados porque, além de apresentarem elevado potencial de custos, também podem dificultar a localização de vazamentos menores.

2.4.2.2. Definição de Rotas e Zonas de Inspeção

A definição e registro das rotas é importante para garantir uma sistematização da inspeção. Ela diminui a probabilidade de componentes importantes não serem verificados devido a esquecimento e evita inspeções duplicadas (retrabalho), tais como: Tubulações de ar comprimido; Válvulas reguladoras de pressão; Relés pneumáticos; Manômetros e Conexões.

2.4.2.3. Inspeção em Campo

O procedimento de ensaio para a identificação e quantificação de vazamentos é regida pela norma ASTM E 1002-11 Método Padrão de Teste de fugas através de ultrassons. Este padrão enfatiza a importância de reduzir a interferência causada por ruído de fundo que pode resultar de outros equipamentos que consomem AC causando o movimento do ar e vibração equipamento.

O resultado da inspeção, a interpretação e o procedimento para fornecer a confiabilidade necessária impõem inspetores que tenham conhecimento sobre os princípios físicos fundamentais para que durante a inspeção leve em consideração as possíveis conversões de modo nos contornos, as diferentes velocidades de propagação, a abertura do feixe sônico e demais parâmetros que, de uma maneira ou outra exerce influência fundamental no procedimento adotado (Almeida, 2016).

É muito importante observar que embora todas as técnicas de ensaios não destrutivos exijam operadores devidamente treinados, a ASNT (*American Society for Nondestructive*

Testing), BSNT (*British Society for Nondestructive Testing*), DZP (*Deustche Gesellschaft für Zerstöerungsfreie Prüfung*), as correspondentes japonesas, francesas etc., estabeleceram os programas e os exames práticos e teóricos visando à qualificação dos inspetores, as técnicas sônicas são as que exigem pessoal com maiores conhecimentos (Almeida, 2016).

A inspeção em campo pode ser subdividida em três etapas: Localização e delimitação de regiões com prováveis vazamentos; Detecção dos componentes com vazamento e Identificação e registro dos vazamentos.

O método de detecção e localização de fugas segue um padrão que, de acordo com a UE SYSTEMS, é realizado de acordo com as etapas apresentadas a seguir.

1. Ajustar a sensibilidade do detector de fugas de ultrassom para um valor máximo.
2. Apontar o detector para a área de teste.
3. Reduzir a sensibilidade conforme o vazamento é abordado.
4. Se necessário utilizar as sondas de focagem que acompanham o detector, que são utilizadas a fim de isolar ultrassons concorrentes, sendo as mesmas responsáveis por aumentar as características de resposta de direção do detector.
5. A leitura de ultrassom e o som no fone de ouvido devem ser seguidos até o ponto mais alto.
6. Para confirmar um vazamento, a sonda de varredura deve ser colocada no local suspeito da fuga e movida ligeiramente para trás e para frente, para cima e para baixo. Se um vazamento estiver presente, a leitura aumentará e diminuirá a intensidade com os movimentos.
7. Identificar o vazamento com etiquetas,
8. Registro em softwares de gestão de vazamentos ou relatórios técnicos
9. Após correção dos vazamentos, repetir a inspeção assegurando a eliminação deles.

2.4.3. Estimativa de Custos

Para estimar os custos dos vazamentos de ar, é necessário correlacionar a vazão de ar com o nível sonoro de ultrassom medido no vazamento. Entretanto, esta estimativa é uma tarefa bastante complicada.

Para Almeida, 2016, além da dificuldade teórica em se correlacionar as turbulências com os sons gerados (audíveis e ultrassons), diversos fatores influenciam na geração de e propagação do ultrassom, conforme apresentado a seguir.

- Pressão do fluido.
- Tipo de tubulação / componente.
- Geometria do orifício de vazamento.
- Tipo do ambiente (local aberto / fechado).
- Distância da medição (fenômeno de atenuação).
- Ângulo de medição (influência da refração no jato).
- Fenômenos de refração, reflexão, reverberação e interferências.

Não obstante a estas influências, alguns fabricantes de detectores ultrassônicos fornecem tabelas ou planilhas, as quais permitem estimar a vazão volumétrica de um vazamento a partir do nível sonoro de ultrassom detectado.

2.5. AUDITORIA ENERGÉTICA

O termo "Auditoria Energética" pode ser entendido de várias formas, tais como: análise energética, avaliação energética ou mesmo diagnóstico energético. Atualmente, é considerado como um termo geral que visa o levantamento atual da utilização de recursos energéticos (FUPAI/ELEKTRO, 2012).

Auditorias em sistemas de AC visam aumentar a produtividade e qualidade reduzindo os custos, as quais são atualmente uma das grandes demandas do mercado. Estas questões são diretamente ligadas à produção industrial, devido às ferramentas e equipamentos que utilizam o AC e ao produto final (Carvalho, 2016).

Existem diversos tipos de auditoria em AC, mas podemos destacar as que detectam vazamentos do sistema e as que consideram o sistema como um todo.

Um ponto importante para garantir a continuidade de políticas com foco em uso eficiente de energia é a adoção de normatização. A norma ABNT NBR ISO 50001 de 2011 trata da implantação de um sistema de gestão de energia, baseada em um conceito PDCA *(Plan Do Check* e *Act*), apresentando a estrutura que deve ser criada para proporcionar melhorias e garantir a melhoria contínua do sistema abrangido, além de criar ciclos de verificação para garantir que as medidas propostas estão sendo implantadas de forma adequada e ações corretivas tem sido implantadas (ABNT, 2011)

A utilização indiscriminada de recursos deve ser observada nas instalações, e estratégias devem ser utilizadas para verificação das perdas. As perdas devem ser verificadas e soluções devem ser estudadas para a sua redução. Em uma análise minuciosa devem ser priorizadas as perdas de maior impacto no resultado global, desde que seja possível amenizá-las.

É necessário que, após a sua eliminação, a segunda perda mais significativa seja analisada e corrigida, conforme sugerido pelo ciclo PDCA (*Plan-Do-Check-Act*) ou "Ciclo de Deming" (DEMING, 1986).

O ciclo PDCA, conforme mostrado na Figura 19, é uma ferramenta desenvolvida na década de 20 por Walter A. Shewhart, e mundialmente consagrada pela sua eficiência e abrangência de aplicação. Foi disseminado em todo o mundo por William Edward Deming, o "guru do gerenciamento da qualidade", e a partir da década de 50, passou a ser conhecido como "Ciclo Deming" (DEMING, 1986).

Este ciclo possui quatro abordagens, sendo a primeira representada pela letra **P** (*Plan*) que significa a definição do problema, o **D** (*Do*) devem ser colocadas em prática as soluções propostas anteriormente, o **A** (*Action)* tomar ações corretivas sobre as diferenças significativas entre os resultados reais e planejados e analisar a eficácia das contramedidas em sua abordagem e **C** (*Correc*t) corrigir os desvios identificados anteriormente, e então, o ciclo poderá ser reiniciado (DEMING, 1986).

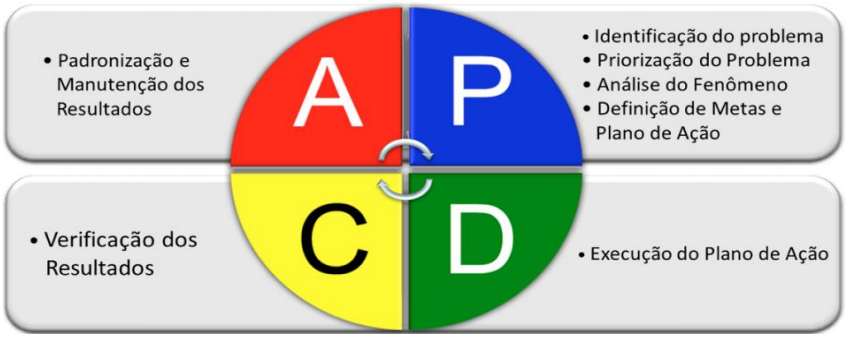


Figura 19. Modelo Conceitual das Etapas do PDCA. Fonte: Adaptado de DEMING (1986).

A utilização desta ferramenta permite um gerenciamento prático das principais atividades e problemas, sendo que por ser um ciclo contínuo promove uma melhoria em cada etapa completada. A análise de problemas é importante para a investigação minuciosa, até a identificação da causa "raiz" (Carvalho, 2016).

Qualquer trabalho ou estudo para possibilitar a redução do consumo ou custos energéticos pode ser considerado uma forma de auditoria. Porém, são recomendadas abordagens que permitam avaliações técnicas e econômicas do problema (FUPAI/ELEKTRO, 2012). É sugerido seguir as etapas citadas no fluxograma da Figura 20, e adaptá-las a cada situação.

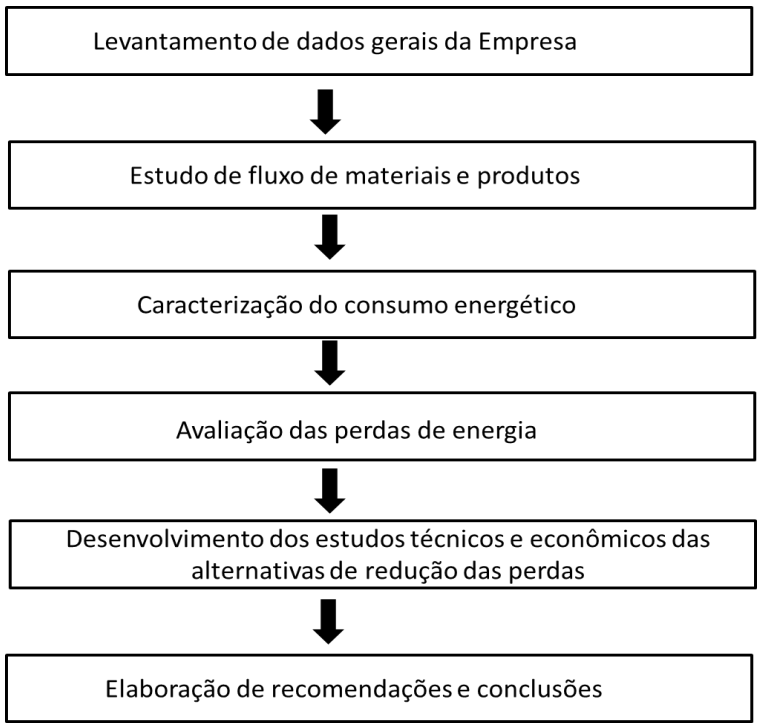


Figura 20. Etapas do Programa de uso Racional de Energia em Empresas. Fonte: Carvalho (2016).

CAPÍTULO 3
ESTUDO DE CASO

O "Estudo de Caso" foi realizado em uma indústria da região do Campo das Vertentes, localizada no sudeste do estado de Minas Gerais. A indústria produz óxidos de tântalo e nióbio, ligas mestras de alumínio e refinadores de grão.

Na Planta Industrial, o ar comprimido (AC) é utilizado como energia pneumática em diversas etapas do processo, tanto para acionamento dos equipamentos pneumáticos, em válvulas e atuadores pneumáticos, como em bombas pneumáticas, que estão instaladas em toda planta e certamente são grandes consumidores de ar comprimido da fábrica.

O funcionamento adequado da instalação é imprescindível por questões relacionadas à segurança no trabalho e produtividade, tornando o sistema de geração de AC uma ferramenta crítica e estratégica.

Inicialmente, em novembro de 2014 foi realizada uma auditoria energética na planta. Após a essa auditoria, entendido o potencial de economia e de melhoria energética, a indústria estudada optou por fazer inspeções na linha de AC regularmente, a cada 6 meses.

A auditoria inicial, realizada em novembro de 2014, e a última inspeção de mitigação de vazamentos ultrassônicos, realizada em junho de 2019, serão apresentadas a seguir.

3.1. AUDITORIA INICIAL

A planta é abastecida por três compressores, Atlas 180VSD, Chicago 22 e Atlas GA, com funcionamentos contínuo, eventual e *standy by*, respectivamente. Os dados técnicos referentes aos compressores estão relacionados na Tabela 5.

Para medir a demanda nos diferentes setores da planta foram utilizados sensores de vazão, pressão e ponto de orvalho, Figura 21, esse último a fim de detectar a presença de água na tubulação. Os sensores foram instalados em locais estratégicos, Figura 22.

Tabela 5. Dados Técnicos dos Compressores

FABRICANTE	POTÊNCIA	OPERAÇÃO	CAPACIDADE	OBSERVAÇÃO
Atlas 180 VSD FF	185 HP	Contínua	1693 m^3/h	Pressão de trabalho de 7 bar
Chicago 22 - 150 MA ID	110 HP	Eventual	1104 m^3/h	Entra em operação se a pressão ficar abaixo de 6,5 bar.
Atlas GA 807	125 HP	Standy by		Entra em operação se a pressão ficar abaixo de 5,5 bar.

Fonte: CBA (2014).



Figura 21. Sensores utilizados para as medições. Fonte: CBA (2014).



Figura 22. Sensores utilizados para as medições. Fonte: CBA (2014).

Os dados dos sensores foram lidos e armazenados, pelo equipamento DS 300 *Mobile*, Figura 23. Os dados dos sensores foram captados por 180 horas ininterruptas, buscando registrar a real condição de funcionando da fábrica e todas as suas variações. Nas Tabelas 6 e 7 tem-se os dados de pressão e vazão coletados nas medições.



Figura 23. Registrador de dados DS 300. Fonte: CBA (2014).

Tabela 6. Dados da Pressão no Sistema.

Pressão média do sistema da medição Principal	7,06 bar	
Pressão média do sistema da medição Ligas Binárias	7,09	
Perda de carga entre Geração e medição no Leito	0,03 bar	
Número de registros	7200	
Número de registros abaixo de 6,5 bar	181	2,51%

Fonte: CBA (2014).

Tabela 7. Dados de Vazão e Consumo.

Maior vazão do sistema (Pressão de 6,39 bar)	2.068,3 m^3/h
Média de vazão do sistema	739,7 m^3/h
Consumo de ar comprimido para o período de 180 horas	133.410 m^3/h
Número de registros	7200
Número de registros acima da média	3583
Número de registros abaixo da média	3617
Consumo anual projetado	5.549.855 m^3/h

Fonte: CBA (2014).

Na Tabela 8 é estimado o custo do metro cúbico de ar comprimido através do consumo dos compressores, em kWh. Apesar do curto período considerado para cálculo do consumo, entre 14/11 e 19/11, ele reflete um valor bem próximo da realidade de todo o mês de novembro, que segundo a Gerência de Manutenção, foi o mês foi de produção constante.

Tabela 8. Consumo Elétrico na Geração de AC.

Consumo acumulado entre 14/11/14 e 19/11/14	14,055 kWh
Geração de ar comprimido	94.803 m^3
Geração por kWh	6,75 m^3/h
Custo do kWh entre fora de ponta e ponta	R$ 0,2887
Custo do ar comprimido	R$ 0,0428/m^3

Fonte: CBA (2014).

Com o custo do metro cúbico do ar comprimido, dados de média de vazão por setor e horas de funcionamento por ano, é possível estabelecer os custos relacionados a cada setor/ramal, conforme Tabela 9.

Tabela 9. Custo da Geração de Ar Comprimido.

GERAÇÃO DE AR COMRPIMIDO			**USOS DO AR COMPRIMIDO**				
	LEITO	**LIGAS BINÁRIAS**	**RAMAL 1[1]**	**RAMAL 2[2]**	**RAMAL 3[3]**	**RAMAL 4[4]**	**RAMAL 5[5]**
Vazão média	701,26 m^3/h	39,9 m^3/h	459,7 m^3/h	196,8 m^3/h	43,5 m^3/h	103,3 m^3/h	356,4 m^3/h
Nº de registros	7200	7200	7200	7200	7200	7200	7200
Nº de horas	180	180	180	180	180	180	180
Consumo no período	126.228 m^3	7.182 m^3	83.078 m^3	35.566 m^3	7.584 m^3	18.431 m^3	64.647 m^3
Nº de horas por ano	7.448	7.448	7.448	7.448	7.448	7.448	7.448
Consumo por ano	5.251.084 m^3	298.771 m^3	3.456.044 m^3	1.479.545 m^3	315.494 m^3	775.998 m^3	2.689.315 m^3
Custo por m^3	R$ 0,042	R$ 0,042	R$ 0,042	R$ 0,042	R$ 0,042	R$ 0,042	R$ 0,042
Custo anual previsto	R$ 220.543,00	R$ 12.548,00	R$ 145.153,00	R$ 62.140,00	R$ 13.250,00	R$ 32.592,00	R$ 112.951,00
PREVISÃO DE GASTOS POR ANO (SOMATORIO) R$ 233.091,00							

Fonte: CBA (2014).

O Ramal **1** refere-se aos Químicos. O "Ramal **2** refere-se as "Anteligas". O Ramal **3** refere-se ao Filtro de Manga, Acabamento, Desenvase e Moagem. O Ramal **4** refere-se a Digestão - Filtro Prensa - Filtro de Manga - Laboratório e o Ramal **5** refere-se a Digestão de Sais - Oficina - Fábrica de Sais - ETE - Misturador por ar comprimido.

Embora sejam apresentados todos os pontos discutidos na auditoria, um enfoque maior será dado aos vazamentos, detectados através da Técnica Ultrassônica.

3.1.1. Identificação dos Problemas e Melhorias

Após os levantamentos e análises realizadas pela visita técnica foram identificados os problemas e propostas as melhorias. As soluções possíveis são de baixo custo e com rápido retorno do capital investido.

3.1.1.1. Sala dos Compressores

- **Limpeza da Sala dos Compressores**

Na Figura 24 tem-se o registro da sala dos compressores onde percebe-se que a limpeza da mesma pode ser mais efetiva.



Figura 24. Condição de limpeza na sala dos compressores. Fonte: CBA (2014).

A limpeza da sala dos compressores é fundamental para que não haja a aspiração de pó e outros elementos pelo compressor.

Sempre que o filtro de admissão ficar saturado haverá queda de rendimento do compressor na sua geração, ocasionando perda de energia e baixa eficiência de geração de ar comprimido.

Manter a sala sempre limpa e bem cuidada. O cuidado na sala dos compressores deve ser estendido a todo o sistema.

- Controle da Temperatura de Admissão do Ar

O ideal é que a temperatura de admissão do ar pelo compressor seja a mais baixa possível. Os dados de desempenho do compressor são sob as seguintes condições de acordo com a norma ISO 1217: Pressão absoluta de admissão 1 bar (14,5 psi) - Temperatura de admissão do ar de 20°C (68 °F).

Em algumas medições a temperatura de admissão chegou a 38°C reduzindo bastante a eficiência do compressor.

A temperatura de admissão também prejudica o funcionamento do secador, pois este entrega uma temperatura mais elevada do que o ideal para o processo de secagem interno do ar comprimido.

A sugestão é que se faça um estudo de uma melhor ventilação da sala dos compressores. O ponto positivo é a existência do exaustor na parte superior da sala.

- Qualidade do Ar - Sistema de Filtragem

É desejável a instalação de um filtro de partículas (3µ) e um filtro removedor de aerossóis de óleo (0,01µ) na linha de Ø 04” dentro do Leito e o mesmo para a linha de Ø 2” que sai para Ligas Binárias.

O ar comprimido resultante desse tratamento é o ar comprimido para instrumentação.

- Conservação do Equipamento

Além do ambiente limpo os equipamentos devem apresentem um aspecto de bem cuidados. O fato de estarem bem pintados e limpos provoca uma atitude positiva dos envolvidos no setor.

- <u>Drenagem</u>

O sistema de drenagem dos compressores e do sistema deve ser reprojetado para drenos de perda zero de ar comprimido e criar uma proteção adicional nos distribuidores de ar. Em razão do secador estar desativado, foi encontrada água em abundância na tubulação, Figura 25.



Figura 25. Presença de água na tubulação. Fonte: CBA (2014).

3.1.1.2. Rede de ar Comprimido

- <u>Tubulação</u>

Na Figura 26 tem-se o registro do avançado de corrosão que parte da rede está apresentando. Foi localizado um ponto de vazamento em razão de avançado estado de corrosão da tubulação. A tendência desse vazamento é crescer.



Figura 26. Estado de conservação da tubulação. Fonte: CBA (2014).

- Drenos de Condensados para Vapor

Remover da rede todos os drenos de condensados do tipo dinâmico em razão de não apresentarem desempenho adequado para ar comprimido. Analisar-se a viabilidade de utilização de drenos pontuais tipo boia com manutenção sistemática e correta.

Foi encontrado um dreno desse tipo instalado nos reservatórios da rede de Ligas Binárias com um vazamento. Na Tabela 10 tem-se o custo anual desse vazamento.

Tabela 10. Custo Anual do Dreno de Condensado dos Tanques Ligas Binárias.

Consumo	$7m^3/h$ x 8736 h = 61,152 m^3
Custo do ar comprimido	R$ 0,042/m^3
Custo anual R$ 2.568,00	

Fonte: CBA (2014).

- Reservatório

Instalação de um reservatório para a linha de químicos (Ramal 1) com 1.500 litros para atender a digestão, filtro prensa, filtro de manga (quando estiver operando corretamente) e a linha que serve o ramal de Digestão de Sais, Fábrica de Sais e ETE. O cálculo de 1.500 litros é baseado na vazão média do sistema neste ramal: 459,7 m³/h.

3.1.1.3. Usos Finais

- Unidades de Tratamento de Ar no Ponto de Usos (FRL)

A grande maioria das unidades de tratamento de ar (filtro + regulador + lubrificador ou filtro + regulador ou filtro/regulados) apresentam estado de conservação precária, conforme mostrado na Figura 27.

Os principais problemas estão relacionados com: elemento filtrante saturado; copo quebrado; dreno vazando; manômetros não funcionando; reguladores sem regulagem adequada de pressão; lubrificadores sem óleo e vazamentos em suas conexões.



Figura 27. Estado de conservação dos filtros, regulador e lubrificador. Fonte: CBA (2014).

Essas unidades influenciam diretamente na eficiência dos equipamentos que eles devem proteger. Sua função, além de proteger o equipamento, é para determinar sua pressão de trabalho e evitar manutenções não programadas prejudicando a produção.

A substituição imediata desses equipamentos é fundamental para melhor o desempenho de bombas pneumáticas, válvulas e cilindros. Deve ser feito junto com os reparos de vazamentos.

- Bombas Pneumáticas

Avaliar a necessidade de um levantamento minucioso das bombas pneumáticas instaladas em toda planta e o potencial de consumo de ar comprimido de cada uma. Certamente elas são os grandes consumidores de ar comprimido da fábrica.

Os pontos mais importantes, no caso de que elas não possam ser substituídas por bombas por motor elétrico, são apresentados a seguir.

- Regulagem de pressão na sua entrada adequada ao trabalho que seja necessário (Mínima pressão possível).

- Que não tenham vazamentos em sua operação de ligações com a rede de ar comprimido.

- Trabalhem dentro de parâmetros econômicos operacionais (Mínimo tempo de operação possível sob mínima pressão e consumo).

- Quando fora de operação a entrada de ar comprimido seja fechada.

- Que não tenham vazamentos em seu conjunto interno.

- <u>Vazamentos</u>

Para detectar os vazamentos ultrassônicos, o Inspetor percorreu toda a linha de ar comprimido da planta industrial com um detector ultrassônico, Figura 28.



Figura 28. Detector ultrassônico utilizado - Leak Detector LD 300. Fonte: CBA (2014).

Após a identificação do vazamento ultrassônico, o mesmo foi sinalizado com uma etiqueta que indica se é um vazamento importante, crítico ou intenso, Figura 29.



Figura 29. Identificação dos Vazamentos Ultrassônico. Fonte: CBA (2014).

Os vazamentos ultrassônicos encontrados na Planta Industrial estão listados no Anexo A e identificados quanto ao grau de intensidade. A Figura 30 mostra o número de vazamentos intenso, crítico e importante encontrados na inspeção. A empresa não quantificou a perda a partir do qual foi feita essa classificação. A maior parte dos vazamentos ultrassônicos pode ser eliminada pela troca ou aperto de conexões, troca de mangueiras ou tubos de polietileno, abraçadeiras etc.

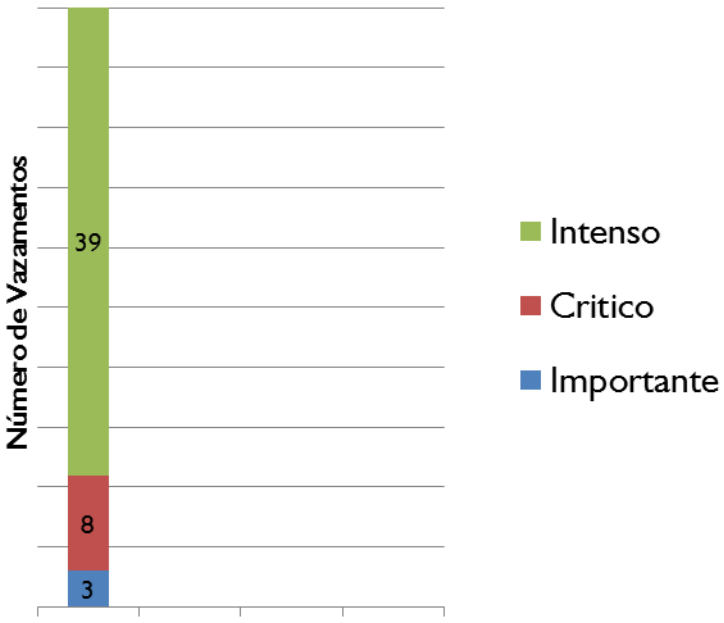


Figura 30. Número de Vazamentos por criticidade. Fonte: Adaptado de CBA (2014).

Na Tabela 10 tem-se a vazão de ar comprimido perdida pelos vazamentos por setor/ramal e quanto essa vazão desperdiçada representa da vazão total do setor/ramal.

Outro dado importante presente na Tabela 11 é o potencial de economia gerada pela eliminação dos vazamentos, que é da grandeza de R$ 45.864,00.

Tabela 11. Vazamentos por Setor/Ramal e Potencial de Economia

LEITO TOTAL = 105 m^3/h	RAMAL 1	RAMAL 4	30 m^3/h	29%
		RAMAL 5	45 m^3/h	12%
	RAMAL 2		20 m^3/h	10%
	RAMAL 3		10 m^3/h	23%
LIGAS BINÁRIAS			20 m^3/h	50%
TOTAL			125 m^3/h	16,80%
Geração de ar comprimido desperdiçado por ano (8736 horas)	1.092.000 m^3	Custo R$ 0,042	**POTENCIAL DE ECONOMIA R$ 45.864,00**	

Fonte: CBA (2014).

Após a identificação e reparação dos vazamentos, as sondas foram posicionadas novamente durante o mesmo período para verificação da demanda energética.

- <u>Usos</u> <u>Indevidos</u>

Foram Localizados dois usos que podem ser substituídos com ganhos financeiros. No Misturador da Potassa por ar comprimido, Tabela 12, substituir por um misturador elétrico. Na Régua e Bicos de Sopro na Anteligas substituir por soprador pneumático.

Tabela 12. Custo do Misturador de Potassa.

Medição Pontual	
Volume de ar comprimido, por ano	80m^3/h x 8736 h = 698.880 m^3
Custo do ar comprimido	R$ 0,042/m^3
Potencial de ECONOMIA R$ 29.352,00	

Fonte: CBA (2014).

- Excesso de Pressão

Em razão dos conjuntos FRL das entradas de válvulas, bombas e outras aplicações não estarem em bom estado de conservação fica impossível se determinar qual a pressão que está trabalhando o equipamento.

O ideal é se ajustar a pressão ao mínimo necessário e não deixar ao alcance do operador a possibilidade de modificar a pressão a qualquer momento. Se for necessária, essa mudança deve ser solicitada ao pessoal encarregado de cuidar do sistema de ar comprimido.

É possível uma redução significativa do gasto de energia elétrica utilizando-se as menores pressões operacionais para o sistema sem nenhum prejuízo da produção. Recomenda-se a aplicação de reguladores de pressão em toda utilização do ar comprimido.

- Usos Impróprios

Utilização de mangueiras abertas para sopro e limpeza. Foram encontradas mangueiras de Ø ¾" para limpeza ligadas a válvula de esfera e sem pistola com bico calibrado, ligada diretamente a rede de ar, mostrado na Figura 31. Esse tipo de aplicação, além de ser um desperdício, é perigosa para o homem, para o ambiente e provoca poluição ambiente, podendo interferir nos mecanismos das máquinas. É recomendado o uso de bicos e pistolas especiais se as aplicações exigirem o uso do ar comprimido desta maneira.



Figura 31. Mangueira de limpeza ligadas diretamente a rede de ar. Fonte: CBA (2014).

- Programa de Manutenção

Foi sugerido a implantação de um programa de manutenção permanente no sistema de ar comprimido abordando os pontos apresentados a seguir.

- Controle de vazamentos contínuo.

- Utilização de conexões, mangueiras e tubulações de boa qualidade e quando possível a utilização de conexões que utilizem anilha para fixação e vedação.

- Controle mensal da demanda de ar comprimido.

- Análise individual dos principais usos de ar comprimido e controlar seu consumo (Filtros de Manga - Filtro Prensa - Bombas Pneumáticas), Tabela 13.

Tabela 13. Custo do Filtro de Manga Criolito

Consumo do motor ligado sem batimento de manga	200m^3/h
Custo por hora	200m3/h x R$ 0,042 = R$ 8,42/h
Horas anuais	1040 h
CUSTO ANUAL R$ 8.736,00	

Fonte: CBA (2014).

- Controle diário da qualidade do ar comprimido gerado (Ponto de Orvalho e Filtragem).

- Controle diário e permanente do sistema de drenagem de condensados.

- Proibição de usos impróprios.

- Manutenção dos equipamentos pneumáticos de forma preventiva.

- Evitar extensões da linha de ar sem acompanhamento do responsável pelo sistema ("puxadinho" da rede de ar).

- Fazer campanha de economia de ar comprimido da mesma maneira que é feita para energia elétrica e água.

- Conscientizar os usuários dos custos do ar comprimido na matriz energética da empresa. Incentivar a economia.

- Ter a sala dos compressores limpa, bem arejada e bem conservada.

- Impedir que os equipamentos pneumáticos fiquem em condições precárias. Se possível proteger o equipamento do ambiente agressivo.

- Resumo do Potencial de Economia

Se medidas corretas forem tomadas em relação ao sistema de ar comprimido, o potencial de economia anual é de, aproximadamente, R$ 135.000,00 por ano, conforme apresentado na Tabela 14.

Tabela 14. Resumo do Potencial de Economia

CUSTO TOTAL DE GERAÇÃO R$ 233.091,00		
DESPERDICIOS		
Vazamentos	R$ 45.864,00	34,1%
Redução de pressão	R$ 11.654,00	8,7%
USOS IMPRÓPRIOS		
Misturador pneumático	R$ 29.352,00	21,8%
Régua e bico para sopro	R$ 36.355,00	27,0%
Filtro de manga criolito	R$ 8.736,00	6,5%
Dreno de condensados	R$ 2.568,00	1,9%
TOTAL	R$ 134.529,00	
POTENCIAL DE ECONOMIA R$ 134.529,00/ ano - 57% da Geração		

Fonte: CBA (2014).

Depois de levantadas as premissas iniciais e analise técnica da situação operacional do SAC, foi realizado um estudo do investimento necessário para que o SAC se tornasse mais eficiente energeticamente. Foram considerados os investimentos com a consultoria, a inspeção por ruído ultrassônico, além dos custos complementares relacionados ao projeto, como custos para a substituição dos componentes e mão de obra.

Na Tabela 15 são apresentados os dados para o cálculo da Taxa Interna de Retorno (TIR). Para realização dos cálculos foi utilizado a taxa de juros SELIC de 10,90% a.a. correspondente à novembro de 2014.

Foi considerado 5 anos como período de vida útil do investimento (auditoria) e a realização de 2 inspeções anuais, no valor total de R$ 10000,00. O valor economizado com energia pela eliminação dos vazamentos, conforme consta na tabela 15 é de R$ 45864,00. Nesta análise a TIR foi de 159 % com retorno do investimento previsto para um período de 0,7 ano.

Tabela 155. Análise da Viabilidade Econômica

ANÁLISE DE INVESTIMENTOS		
Vida útil	5	Anos
Taxa de Juros (SELIC 2014)	10,90%	
Investimento Inicial (Auditoria)	18000,00	R$
Inspeção Caça Vazamentos	10000,00	R$/ano
Custo Reparos (Materiais)	1665,00	R$/ano
Custo Reparos (Mão de Obra corretiva)	5355,00	R$/ano
Investimento TOTAL	17020,00	R$/ano
Economia de eletricidade anual	45864,00	R$/ano
Saldo anual	28844,00	R$/ano
Tempo de retorno	0,7	Anos
Valor presente líquido	88873,17	R$
Taxa interna de retorno	159%	a.a
Índice de Lucratividade	594%	

Fonte: Autora.

3.2. INSPEÇÃO REALIZADA EM JUNHO DE 2019

A última inspeção na planta foi realizada em 05/06/2019, por uma empresa contratada. Essa inspeção não fez parte de um programa de auditoria energética do SAC e não traz a análise de viabilidade financeira.

3.2.1. Critérios de Localização dos Pontos (componentes) com Desvios

No instante em que se inspecionou um componente, o inspetor realizou uma rigorosa seleção preliminar para determinar se este componente se encontra em situação normal, ou não. Havendo alguma anormalidade será feito um registro dos valores de ruído medido em dBµV, mais a imagem digital para posterior diagnóstico. Esta seleção preliminar foi realizada com a utilização de aparelho de ultrassom.

3.2.2. Equipamentos Utilizados

O equipamento utilizado foi o detector de vazamento ultrassônico, Sonochek, com frequência central 40 kHz ±1 kHz, Figura 32.



Figura 32. Detector de vazamento ultrassônico, Sonochek. Fonte: https://www.mltfinland.fi/sonochek/

Todos os pontos inspecionados foram listados, assim como a situação encontrada, de normalidade ou desvio. Também consta o número de pontos com desvio em cada equipamento. Estas informações estão disponíveis no Anexo B.

Dos 80 equipamentos inspecionados, 49 apresentaram operação com desvio, ou seja, presença de vazamentos ultrassônicos, enquanto 31 apresentaram funcionamento normal, conforme mostrado na Figura 33.

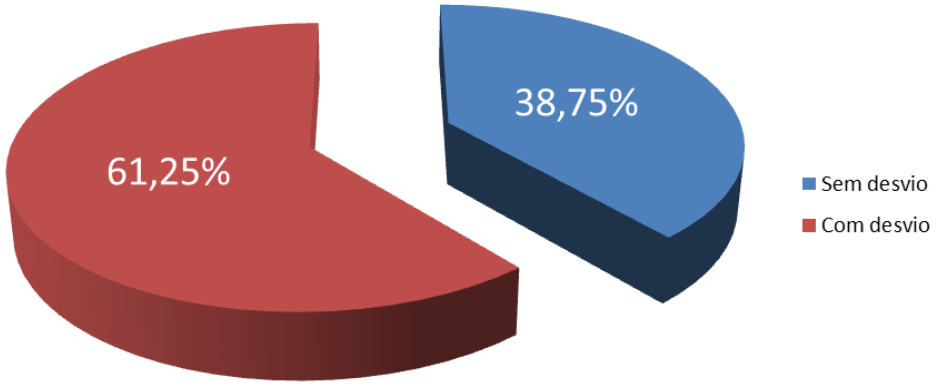


Figura 33. Condição dos equipamentos inspecionados. Fonte: Prüftechnik (2019).

Na Figura 34 tem-se os valores da intensidade sonora quanto a criticidade do vazamento. Foram considerados vazamento com necessidade de correção urgente, aqueles com registro acima de 55 dB. Já os vazamentos com registros de medição abaixo de 55 dB devem entrar no planejamento para manutenção em momento oportuno.



Figura 34. Classificação dos vazamentos quanto à intensidade sonora. Fonte: Prüftechnik (2019).

Na literatura não foram encontradas informações consistentes que apontam esse valor de 55 dB como referência para classificação de vazamentos.

Com base nas informações do Anexo C e Figura 34 tem-se o número de equipamentos que necessitam de intenções urgentes e equipamentos com intervenção programada, conforme apresentado na Figura 35.

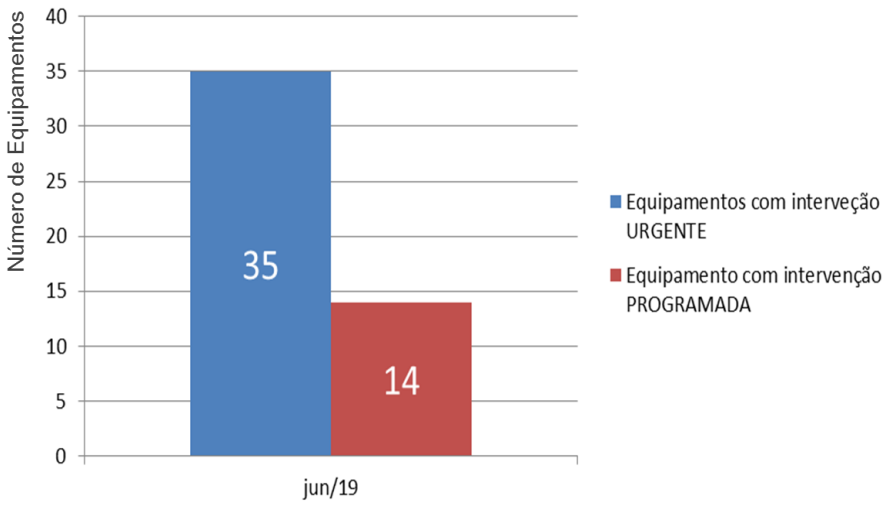


Figura 35. Equipamentos com intervenção URGENTE e PROGRAMADA. Fonte: Prüftechnik (2019).

3.3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na auditoria foi avaliado o perfil de consumo de Ar Comprimido (AC) através do monitoramento das vazões por setor/ramal.

Verificou-se que é possível aumentar a eficiência energética global do sistema e reduzir os gastos na geração de AC com a correção dos vazamentos, ajuste de uma pressão compatível com a necessidade e controle de usos impróprios.

O método utilizado, com sensores de vazões tem alta precisão e é o mais indicado para análises confiáveis de perdas energéticas.

No segundo caso, a realização da inspeção, é muito eficiente para detectar os vazamentos, porém as análises a partir dos níveis de decibéis fornecem apenas uma estimativa superficial dos níveis dos vazamentos, pois como já foi visto anteriormente, fatores como turbulência, configuração do orifício, pressão, umidade, distancia, sensibilidade do equipamento podem afetar significativamente os resultados.

CAPÍTULO 4
CONCLUSÃO

Para continuarem competitivas, com alto valor de mercado e boa rentabilidade, as indústrias precisam se adaptar às tendências de mercado. As soluções mais adequadas são encontradas com uma análise individualizada. Independente do mercado de atuação é uma tendência mundial a busca pela melhoria na qualidade dos processos, na eficiência energética e na atividade de manutenção, resultando em altos índices de disponibilidade e confiabilidade.

A Técnica Ultrassônica pode contribuir para se otimizar a eficiência energética de um sistema de ar comprimido industrial. Além do funcionamento relativamente simples e um baixo valor de investimento com equipamento e treinamento de instrutores, o retorno financeiro com a identificação dos vazamentos é significativo, comprovado pelo estudo de caso.

O estudo de caso envolveu medições e vistoria em um sistema de ar comprimido de uma indústria para avaliar as ações indicadas. O estudo englobou a avaliação de ações de eficiência energética citando vários pontos de melhoria, destacando-se a necessidade do reparo de vazamento de ar comprimido pela tubulação da linha.

A partir dos resultados obtidos, as ações propostas apresentam um alto potencial de economia de energia. Os ganhos das propostas são da ordem de 57% da geração, sendo que a eliminação dos vazamentos é o fator que mais contribui para essa economia, sendo verificado ganho da ordem de 34,1% da geração de AC da planta. Do ponto de vista econômico as possibilidades são apropriadas para investimento, com destaque para a redução de vazamentos que apresenta baixa complexidade de execução, TIR de e um *payback* de 0,7 ano.

Tendo em vista as significativas perdas com vazamentos ultrassônicos e da eficiência da Técnica Ultrassônica, as inspeções devem ser realizadas periodicamente, e devem estar

alinhadas com um eficaz planejamento da manutenção para suas devidas correções de forma planejada (Manutenção Corretiva Planejada), visando ganhos tanto de econômica quanto de eficiência energética.

Para trabalhos futuros sugere-se dar continuidade ao projeto da Banca Experimental onde será possível inserir rotâmetros e válvulas reguladoras de pressão e realizar testes com diferentes diâmetros e quantificar suas respectivas perdas energéticas através da Técnica Ultrassônica. Também sugere dar continuidade ao programa computacional para transformar o ruído ultrassônico em dados a serem tratados através de processamento de sinais, utilizando a Técnica de Transformada de Fourier, de forma a identificá-lo através de espectros relacionando as possíveis frequências determinísticas com a intensidade sonora. Além disso, estabelecer um valor de alarme, em dB, para caracterizar a severidade dos vazamentos e sua prioridade de reparo.

ANEXOS

ANEXO A

Vazamentos Ultrassônicos encontrados na Planta Industrial na inspeção de 2014.

ETIQUETA	INTENSIDADE	LOCALIZAÇÃO
1	Intenso	Comporta da ETE- Mangueira de entrada do FRL
2	Intenso	Comporta da ETE - Entrada do filtro de ar
3	Intenso	Comporta da ETE - Saída do lubrificador
4	Intenso	Decantador - dreno do filtro - bomba P400
5	Intenso	Decantador - conexão da entrada da válvula
6	Importante	Decantador - válvula com vazamento
7	Intenso	Tanque da água de sais 01 - entrada da válvula
8	Intenso	Tanque da água de sais 02 - cotovelo vazando
9	Intenso	Bomba de alimentação do decantador - conexão de entrada do filtro
10	Intenso	Válvula rotativa com vazamento
11	***	Fábrica de sais - haste de cilindro áspera - vazamento no mancal
12	Intenso	Fábrica de sais - centrifuga - saída da válvula de esfera
13	Crítico	Fábrica de sais - conexão de saída para a válvula de esfera para a bomba
14	Intenso	Fábrica de sais - entrada da bomba
15	Intenso	Fábrica de sais - tubulação furada por ferrugem
16	Intenso	Fábrica de sais - tanque 126 - entrada da bomba
17	Intenso	Fábrica de sais - tanque 126 - vazamento na união
18	Intenso	B7 - tanque de precipitação
19	Intenso	Bomba PN precipitação - Entrada da bomba
20	Importante	Entrada da válvula de controle
21	Intenso	Mangueira do tanque T5
22	Intenso	Vazamento na união atrás do D7
23	Intenso	Válvula pneumática HF - D6
24	Intenso	Alimentação V2
25	Intenso	Plataforma do C - saída da válvula de esfera
26	Intenso	Plataforma do C - entrada da válvula solenoide
27	Intenso	Plataforma do C – entrada da válvula solenoide

Vazamento Ultrassônicos encontrados na Planta Industrial (Continuação).		
28	Intenso	Plataforma do C - saída para a montagem do regulador
29	Intenso	Tubulação na entrada do digestor
30	Intenso	União de entrada do digestor
31	Crítico	Acabamento - serra fita - conexão da válvula
32	Crítico	Acabamento - serra fita - indicação do lubrificador
33	Intenso	Coluna - saída da mangueira para enrolador
34	Intenso	Ciclo de potassa - válvula trincada
35	Crítico	Ciclo de potassa - conexão da válvula solenoide Gemu
36	Crítico	Ciclo de potassa – mangueira
37	Intenso	Ciclo de potassa - corpo da válvula
38	Intenso	Corpo da válvula – conexão
39	Intenso	Dique pré lavador - válvula solenoide - entrada da válvula de controle
40	Intenso	Dique pré lavador - mangueira de saída da válvula de esfera
41	Intenso	Dique pré lavador - mangueira de saída da válvula esfera
42	Intenso	Dique pré lavador - conexão de entrada da válvula
43	Intenso	Dique pré lavador - rosca da válvula de esfera
44	Intenso	Ligas binarias - dreno de condensado dinâmico do reservatório
45	Intenso	Ligas binarias - manômetro de linha
46	Crítico	Ligas binarias - conexão da válvula de alívio do reservatório
47	Crítico	Ligas binarias - união da tubulação da parede
48	Crítico	Ligas binarias - entrada de ar no forno
49	Importante	Anteligas - escape da válvula
50	Intenso	Anteligas - subida para orbital
51	Intenso	Anteligas – laminador

Fonte: CBA (2014).

ANEXO B

Roteiro de Inspeção por Detector de Vazamento Ultrassônico, inspeção de 2019.

AREAS / EQUIPAMENTOS	INSPECIONADO		SITUAÇÃO		PONTOS
	SIM	NÃO	NORMAL	DESVIO	
AMG PLANTA					
Betancira - Sistema Bomba	X		X		
TUBULÇÃO PRINCIPAL DA ETE					
Válvula Pneumática	X			X	1
Regulador de Pressão	X			X	1
Leito de Cal 01 E 02	X		X		
CENTRIGUGAS DECANTER					
Regulador de Pressão Rosca ETE	X			X	1
Tanque de Polímero Estocagem	X			X	1
Conexão Válvula Tanque Água de Sais	X			X	1
Válvula Pneumática Tanque Água Sais	X			X	1
Conexão Valvula Pneumática	X			X	1
FÁBRICA DE SAIS – TANQUES					
Regulador de Pressão	X			X	1
Regulador Bomba Tanque 130	X			X	2
Centrífuga Tanque 131	X			X	1
Bomba Tanques 106	X		X		
Bomba Tanque 125 – 126	X		X		
Tubulação Alimentação Galpão	X		X		
PRECIPITAÇÃO					
Bombas P7 - P8	X		X		
Sistema de AR que vai para o Lote	X			X	1
Filtro Prensa Nióbio	X		X		
Filtro Prensa Tântalo	X		X		
Alimentação da Bomba	X			X	1
Bomba Lavador de Gases	X		X		
Sistema Belfano Tântalo	X		X		
Sistema Lote	X		X		

Roteiro de Inspeção por Detector de Vazamento Ultrassônico (Continuação).				
EXTRAÇÃO				
Acionamento da Buzina	X	X		
Tubulação 1º Piso	X	X		
Tubulação Alimentação Válvulas	X		X	1
Tubulação Alimentação Prédio	X	X		
ANTIGA DIGESTÃO				
Laboratório	X	X		
TANQUE DOSAGEM HF				
Rotâmetro HF	X		X	1
Válvulas TQ Complexado	X		X	4
Bomba Peristáltica Belfano	X	X		
Alimentação da Bomba Peristáltica	X		X	1
Válvula Bomba Peristáltica	X		X	1
Válvula Pneumática	X		X	1
Válvula HF Manda Digestão	X		X	1
OFICINA MECÂNICA				
Próximo ao Torno	X		X	1
Bancada do Meio	X	X		
PRÉDIO DA DIGESTÃO				
Válvula Tanque C1	X		X	1
Tubulação Aérea	X		X	1
Alimentação Válvula de HF	X		X	1
PRÉDIO DA DIGESTÃO (Continuação)				
Alimentação Válvula Tanque D2	X		X	2
Alimentação Válvula Tanque D3	X		X	1
Alimentação Válvula HF Tanque D3	X		X	1
Alimentação Válvula Tanque D4	X		X	1
Alimentação Válvula HF Tanque D4	X		X	1
Alimentação Válvula Tanque D5	X		X	1
Filtro Prensa da Digestão	X	X		
Regulador da Mangueira Limpeza	X		X	1
Alimentação Válvula HF D6	X		X	1
Alimentação Válvula HF D8	X		X	1

Roteiro de Inspeção por Detector de Vazamento Ultrassônico (Continuação).				
Alimentação Válvula D8	X		X	1
LABORATÓRIO				
Sala do ICO	X	X		
Sala Moinho de Amostra	X	X		
Filtro Atrás do Laboratório	X		X	1
Britagem de Criolita	X	X		
ANTELIGAS				
Sistema Orbital	X	X		
Laminador Mangueira	X		X	1
Mangueira Alimentação Tocha	X		X	2
Manômetro Sistema Roda	X		X	1
Quadro de Válvulas da Roda	X		X	1
Laboratório Metalográfico	X	X		
Vaso de Pressão	X	X		
Alimentação Despoeiramento	X		X	1
Batimento de Mangas	X	X		
Sistema Leito	X	X		
Compressores	X	X		
LIGAS BINARIAS				
União Tubulação Suspensa	X		X	1
CÂMARA DE ÁCIDOS				
Válvula Tanque de HF	X		X	1
Regulador de Pressão	X		X	1
Válvula Tanque de HF	X		X	1
ACABAMENTO				
Válvula Próximo Máquina de Varetas	X		X	1
Cintadeira Bobinadeira Tibal	X		X	1
Regulador de Pressão	X		X	1
Válvula Confort	X		X	1
Bobinadeira	X	X		
Tubulações Booster Conform	X		X	2
Máquina Cortar Barras	X		X	1

Roteiro de Inspeção por Detector de Vazamento Ultrassônico (Continuação).		
MOAGEM		
Pontos para uso	X	X
Sistema Desenfase HF	X	X
Sistema Descarregamento Ácidos	X	X

Fonte: Prüftechnik (2019).

ANEXO C

Medições Sonoras de cada Vazamento, inspeção de 2019.

AREA	TAG EQUIPAMENTO	RUIDO MEDIDO (dbµV)	PRESSÃO NA LINHA (bar)
Tubulação principal ETE	Regulador de pressão	61	7,5
Tubulação principal ETE	Válvula pneumática	61	7,5
Tubulação principal ETE	Regulador de pressão rosca ETE	67	7,5
Tubulação principal ETE	Tanque de polímeros estocagem	47	7,5
Tubulação principal ETE	Conexão válvula tanque água sais	75	7,5
Tubulação principal ETE	Válvula pneumática tanque água sais	57	7,5
Tubulação principal ETE	Conexão válvula pneumática	63	7,5
Fábrica de sais	Regulador bomba tanque 130	70	7,5
Fábrica de sais	Regulador de pressão	50	7,5
Fábrica de sais	Centrifuga tanque 131	50	7,5
Precipitação	Sistema de ar que vai para o lote	47	7,5
Precipitação	Alimentação da bomba	83	7,5
Extração	Tubulação de alimentação válvula	70	7,5
Tanque dosagem HF	Rotâmetro HF	55	7,5
Tanque dosagem HF	Válvula tanque complexado	50	7,5
Tanque dosagem HF	Alimentação bomba peristáltica	35	7,5
Tanque dosagem HF	Válvula bomba peristáltica	70	7,5
Tanque dosagem HF	Válvula pneumática	70	7,5
Tanque dosagem HF	Válvula HF para digestão	55	7,5
Oficina	Regulador de pressão próximo ao torno	50	7,5
Prédio Digestão	Válvula tanque C1	79	7,5
Prédio Digestão	Tubulação aérea	50	7,5
Prédio Digestão	Alimentação válvula de HF	50	7,5
Prédio Digestão	Alimentação válvula tanque D2	57	7,5
Prédio Digestão	Alimentação válvula tanque D3	70	7,5
Prédio Digestão	Alimentação válvula HF tanque D3	54	7,5
Prédio Digestão	Alimentação válvula tanque D4	58	7,5
Prédio Digestão	Alimentação válvula HF tanque D4	58	7,5

Medições Sonoras de cada Vazamento (continuação).

AREA	TAG EQUIPAMENTO	RUIDO MEDIDO (dbµV)	PRESSÃO NA LINHA (bar)
Prédio Digestão	Alimentação válvula tanque D5	61	7,5
Prédio Digestão	Regulador mangueira de limpeza	60	7,5
Prédio Digestão	Alimentação válvula HF D6	78	7,5
Prédio Digestão	Alimentação válvula HF D8	70	7,5
Prédio Digestão	Alimentação válvula D8	56	7,5
Laboratório	Filtro atrás do laboratório	51	7,5
Anteligas	Laminador mangueira	70	7,5
Anteligas	Mangueira tocha	70	7,5
Anteligas	Manômetro sistema roda	80	7,5
Anteligas	Quadro de válvulas da roda	60	7,5
Anteligas	Alimentação despoeiramento	93	7,5
Ligas Binárias	União tubulação suspensa	45	7,5
Câmara de ácidos	Válvula tanque HF	50	7,5
Câmara de ácidos	Regulador de pressão	67	7,5
Câmara de ácidos	Válvula tanque	50	7,5
Acabamento	Válvula próximo maquina varetas	45	7,5
Acabamento	Cintadeira bobinadeira tibal	63	7,5
Acabamento	Regulador de pressão	55	7,5
Acabamento	Válvula conform	60	7,5
Acabamento	Tubulação Booster conform	60	7,5
Acabamento	Cilindro mangueira cortar barras	68	7,5

Fonte: Prüftechnik (2019).

REFERÊNCIAS

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR ISO 50001. **Sistema de gestão da energia - Requisitos com orientação para uso.** 2011.

ABNT Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR ISO 55000. Gestão de ativos - Visão geral, princípios e terminologia. 2014

ALMEIDA, C. M. **Inspeção de Vazamentos em Rede de Ar Comprimido Utilizando Ultrassom:** Aspectos Teóricos e Estudo de Caso. TCC (Especialização) - PolI, UFRJ, RJ, 2016.

ALVES, G. A. **Eficiência Energética em um Sistema de Ar Comprimido.** Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, 2018.

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica; Atlas de Energia Elétrica do Brasil, 3ª edição, 2008. Disponível em: . Acesso em: 8 outubro 2016.

ATLAS COPCO. **Manual do ar comprimido/ Air Scan**. Disponível em: http://www.atlascopco.com.br

ATLAS COPCO, **Distribuição de Ar**, número: 15, ano: 2002.

ATLAS COPCO., **Compressed Air Manual**, Belgium: Atlas Copco Airpower NV, 2015.

ATLAS COPCO., **Manual de Eficiência Energética em Sistemas de Ar Comprimido**, Lisboa: ADENE - Agência para a Energia, 2016.

BALDISSARELLI, L.; FABRO, E. **Manutenção Preditiva na indústria 4.0** Scientia cum Industria, V. 7, N. 2, PP. 12 - 22, 2019

BENEDETTI, M., BONFA, F., BERTINI, I., INTRONA, V., & UBERTINI, S. **Explorative study on Compressed Air Systems' energy efficiency in production and use: First steps towards the creation of a benchmarking system for large and energy-intensive industrial firms.** Applied Energy, v. 227, p 436-448; October 2018.

BOSCH, Robert Limitada, **Tecnologia de ar comprimido**, Brasil, 2008.

BRANDES, A. **Ultrasonic Condition Monitoring in Power Plants.** ASME Power Conference EUA, 2009.

BRANDES, A. **Ultrasonic condition monitoring.** Asset Management & Maintenance Journal. EUA, 2013.

BUCKLEY, J. M. **An overview of the predictive maintenance applications of airborne ultrasound testing.** 4th International Conference on NDT. Grécia, 2007.

CARUANA, L., REFALO, P. **Sustainability analysis of a compressed air system.** Engineering Sustainability & Sustainable Energy (ESSE ’18) Conference. Malta, 2018.

CARVALHO, A. L. **Análise da Auditoria Energética na Geração de Ar Comprimido: Um estudo de caso em uma indústria química na região do Campo das Vertentes**. Dissertação de Mestrado. UFSJ, 2016.

CBA. Central Brasileira de Automação. **Relatório de Serviços.** 2014.

CENTRAIS ELÉTRICAS BRASILEIRAS, FUPAI/EFICIENCIA **Eficiência Energética em Sistemas de Ar Comprimido**. Rio de Janeiro: Eletrobrás, 2005.

COMPRESSED AIR AND GAS INSTITUTE **Manual de Ar Comprimido e Gases**; Pearson Education do Brasil; Brasil; 8820 p.; 2004.

DEMING, W. E. **Out of the Crisis.** MIT Center for Advanced Engineering Study, 1986.

DEMO, P. **Pesquisa e Construção de conhecimento: metodologia científica no caminho de Habernas**. Rio de Janeiro: Tempo Brasileiro, 2000, 125 p.

DUDIĆ, S., IGNJATOVIĆ, I., ŠEŠLIJA, D., BLAGOJEVIĆ, V., STOJILJKOVIC, M.. **Leakage quantification of compressed air using ultrasound and infrared thermography.** Measurement. Sérvia, 2012.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética. **Eficiência Energética e Geração Distribuída** para os próximos 10 anos (2015-2024). Rio de Janeiro: 2016. Relatório Técnico.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética. **Balanço Energético Nacional**. Relatório Síntese / ano base 2018. Rio de Janeiro, 2019

FREITAS, A. M. A. D**. Eficiência energética em sistemas de ar comprimido**. Dissertação de Mestrado. Universidade de Coimbra, Portugal, 2017

GUENTHER, T.; KROLL, A. **Automated detection of compressed air leaks using a scanning ultrasonic sensor system.** IEEE Sensors Applications Symposium (SAS), Itália, 2016.

INGERSOLL Rand, **Air Quality Guide**, United Kingdom, 2004.

LAVADO, A.L.C.; **Os actuais desafios da energia: implementação e utilização das energias renováveis.** Lisboa, 2009. 68p. Dissertação de Mestrado em Ciências e Tecnologias do Ambiente - Faculdade de Ciências, Departamento de Biologia Animal, Universidade de Lisboa, 2009.

LIAO, P., CAI, M. SHI, Y. FAN, Z. **Compressed air leak detection based on time delay estimation using a portable multi-sensor ultrasonic detector**. Measurement science and technology. China, 2013.

LITTLE, H., DITCHBURN, S., MACKERTICH, H. **Ultrasound leak detection.** Conference: Safety on Offshore Installations. Reino Unido, 1999.

METALPLAN **Manual de ar comprimido**. 6ª Edicão, 2017.

MME - Ministério de Minas e Energia; Matriz Energética Nacional 2030. Edição 2007a. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/web/guest/publicacoes-e-indicadores/matrizenergetica-nacional-2030> .Acesso em: 22 de janeiro 2018.

MOUSAVI, S; KARA, S; KORNFELD, B. **Energy Efficiency of Compressed Air Systems.** In: CIRP Conference on Life Cycle Engineering, 21. Trondheim, Norway. 2014. p. 1-2.

MUENCH, H. J., STREUBER, W**. Fast detection of leakages. Ultrasonic sensors: Fast and reliable detection of leakages in compressed-air networks**. MM. Maschinenmarkt. Alemanha , 2002.

OLESKO, H.D. **Uma proposta de eficiência energética para sistemas de ar comprimido industriais.** Especialização em eficiência energética. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2013.

OLIVEIRA, P. F. L. **Análise de eficiência dos sistemas de ar comprimido em unidades industriais.** Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, 2018.

PARKER TRAINING. **Tecnologia Pneumática Industrial**. Revisão 1; Jacareí; Brasil; 196 - p.; 2007.

PRÜFTECHNIK MGS. **Relatório de Serviço.** 2019

RADGEN, P., BLAUSTEIN, E. (Eds), **Compressed Air Systems in the European Union**, Energy, Emissions, Savings Potencial and Policy Actions, Final Report October 2000

SAIDUR, R; RAHIM, N.A.; HASANUZZAMAN, M. **A review on compressed-air energy use and energy savings.** Renewable and Sustainable Energy Reviews 14, 2010.

ŠEŠLIJA, D. D., MILENKOVIĆ, I. M. , DUDIĆ, S. P., ŠULC, J. I. **Improving energy efficiency in compressed air systems.** Thermal Science: Vol 20, 2016.

UE SYSTEMS, **Manual de instrução Ultraprobe 100.** Disponível em: http://uesystems.eu/manuals/pt/manual-pt-UP100.pdf. Acesso em 09/07/2018.

UE SYSTEMS. **Ultrassom propagado no ar.** 2007.

US DOE - United State Department of Energy. **Improving Compressed Air System Performance** - A Sourcebook for Industry. 3ª ed, 2016. Disponível em < https://www.energy.gov/sites/prod/files/2016/03/f30/Improving%20Compressed%20Air%20Sourcebook %20version%203.pdf>. Acesso em 16/08/18.

XAVIER J. A. N., PINTO, A. K., **Manutenção Função Estratégica.** 5ª Edição. Rio de Janeiro. Editora Qualitymark 560p. 2019.

WOLSTENCROFT, H.; NEALE, J. **Characterisation of compressed air leaks using airborne ultrasound**. Acoustics 2008, Geelong, Victoria, Australia, 2008.

Disponível em: https://www.amazon.co.uk/Air-Gas-Vacuum-Steam-Detector/dp/B00FIMFK78. Acesso em 10/09/2019.

Disponível em: https://www.tekno-test.com/urun-kategori/basinc/basincli-hava-kacak-dedektoru/. Acesso em 10/09/2019.

Disponível em: https://cba-automacao.com.br/detector-fotografico-de-vazamentos-para-ar-comprimido-lks1000-synergys/. Acesso em 10/09/2019.

Disponível em: http://www.sgspartners.com.br/pdf/locator_pdf5.pdf. Acesso em 11/09/2019.

Disponível em: http://www.sgspartners.com.br/pdf/locator_pdf5.pdf. Acesso em 11/09/2019.

Disponível em: http://www.sgspartners.com.br/pdf/locator_pdf5.pdf. Acesso em 11/09/2019.

Disponível em: http://www.sgspartners.com.br/pdf/locator_pdf5.pdf. Acesso em 11/09/2019.

Disponível em: https://www.mltfinland.fi/sonochek/. Acesso em 11/09/2019.

Disponível em: https://www.directindustry.com/pt/prod/sdt-ultrasound-solutions/product-30375-1937113.html. Acesso em 18/12/2019.

Disponível em: https://www.directindustry.com/pt/prod/sdt-ultrasound-solutions/product-30375-984359.html. Acesso em 18/12/2019.