UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO JOÃO DEL REI
Departamento de Ciências Térmicas e dos Fluidos
Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Energia

Alisson Lara de Carvalho

Análise da Auditoria Energética na Geração de Ar Comprimido: Estudo de caso em uma indústria química na região do Campo das Vertentes

São João del Rei
2016

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)

C331a

Carvalho, Alisson Lara de .
Análise da Auditoria Energética na Geração de Ar Comprimido: Estudo de caso em uma indústria química na região do Campo das Vertentes / Alisson Lara de Carvalho ; orientadora Teresa Cristina Bessa Nogueira Assunção. -- São João del-Rei, 2016.
89 p.

Dissertação (Mestrado - Mestrado em Engenharia de Energia) -- Universidade Federal de São João del Rei, 2016.

1. Sistema de ar comprimido. 2. Auditoria energética. 3. Analise econômica. I. Assunção, Teresa Cristina Bessa Nogueira, orient. II. Título.

Alisson Lara de Carvalho

Análise da Auditoria Energética na geração de Ar Comprimido: Estudo de caso em uma indústria química na região do Campo das Vertentes

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 em, 15 de dezembro de 2016

Banca Examinadora

Prof. Dr. Teresa Cristina Bessa Nogueira Assunção
(Orientador, UFSJ).

Prof. Dr. Bruno Márcio Agostini
(Examinador externo, IF Sudeste MG).

Prof. Dr. Flávio Neves Teixeira
(Examinador interno, UFSJ).

São João Del Rei – MG
2016

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais o Sr. José de Arimatéia e Cleusa, pelo apoio incondicional na luta pelo saber, aos amigos da Saint-Gobain Materiais Cerâmicos que colaboraram para realização do mesmo e a minha namorada Júlia Assunção.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por ter me dado capacidade de finalizar este trabalho, mesmo nos momentos difíceis ao conciliar trabalho e mestrado.

Agradeço a minha orientadora Teresa, pela paciência e orientações em todas as etadas de desenvolvimento deste trabalho.

A minha namorada Júlia Assunção que me deu suporte e teve paciência durante as noites e fim de semana.

E aos meus pais Sr. José de Arimatéia e Cleusa Aparecida pelo apoio incondicional em todos os momentos.

A Universidade Federal de São João del Rei pelo ensino de qualidade ministrado em todos os segmentos em que atua, e aos docentes e técnicos desta renomada instituição, em especial aos professores Dr. Flavio Neves e Dr. José Antônio.

EPÍGRAFE

“Por não saber que era impossível foi lá e fez.”

(Jean Cocteau)

RESUMO

Em um contexto de globalização e uma incessante busca por redução de custos no setor industrial, a auditoria energética demonstra ser uma prática eficaz para reduzir custos e aumentar a competitividade, se destacando em aplicações com ar comprimido que é um dos maiores consumidores de energia elétrica em instalações industriais. Diante deste fato, o presente trabalho apresenta um estudo de caso onde foi realizado uma auditoria energética no sistema de ar comprimido de uma indústria química na região do Campos das Vertentes, no qual foi constatado um potencial econômico de 25% no consumo específico de energia elétrica. São abordados os fatores que proporcionaram aumento da eficiência energética na instalação, bem como a possibilidade de recuperação de calor proveniente do sistema de ar comprimido para aquecimento de água e secagem de produtos e a aplicação da norma ABNT NBR ISO 50001 na instalação para a implantação de um sistema de gestão de energia.

Palavras Chave: Sistema de ar comprimido, auditoria energética, analise econômica;

.

ABSTRACT

In a context of globalization and a constant search for cost reduction in the industrial sector, energy audit proves to be an effective practice to reduce costs and increase competitiveness, especially in compressed air applications is one of the largest electricity consumers in industrial plants. Given this fact, this paper presents a case study which was carried out an energy audit in the compressed air system of a chemical industry in the fields of Strands region in which it was found an economic potential of 25% in the specific energy consumption . the factors that provided increased energy efficiency in the facility, as well as the possibility of heat recovery from the compressed air system for heating water and drying products and the application of the standard ISO 50001 at the facility are covered for the implementation of An energy management system.

Keywords: Compressed air system; energy audit; economics analysis;

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Compressor de Cilindro de Simples Efeito.
Figura 2. Compressor de Descolamento Positivo a Pistão.
Figura 3. Compressor Dinâmico do Tipo Centrífugo
Figura 4. Compressor Tipo Parafuso Isento de Óleo.
Figura 5. Compressor tipo parafuso Figura 6. Ciclo de Compressão de um Compressor do Tipo Parafuso. 1 – Admissão e 2 à 4 compressão gradual do ar.
Figura 6. Ciclo de Compressão de um Compressor do Tipo Parafuso. 1 – Admissão e 2 à 4 compressão gradual do ar.
Figura 7. Esquema de Funcionamento de Secadores Dessecantes.
Figura 8. Esquema de Funcionamento de Secador de Membrana.
Figura 9. Esquema de Funcionamento de um Secador Tipo Refrigeração.
Figura 10. Moinho a Ar Comprimido.
Figura 11. Filtro de Despoeiramento GW Equipamentos.
Figura 12. Mangas Plissadas
Figura 13. Diagrama de Despoeiramento
Figura 14. Pistola de Pintura.
Figura 15. Chave de Impacto Ingersoll Rand.
Figura 16. Cilindros e Atuadores Pneumáticos.
Figura 17. Custos Envolvidos na Instalação de Ar Comprimido.
Figura 18. Ciclo PDCA.
Figura 19. Etapas de um Programa de Uso Racional de Energia.
Figura 20. Etapas de um Programa de uso Racional de Energia em Empresas
Figura 21. Exemplo de Diagrama de Sankey.
Figura 22. Casa de Compressores da Planta de SiC 2010.
Figura 23. Regime de funcionamento da central principal de compressores no dia 31/01/2010.
Figura 24. Regime de funcionamento da central principal no dia 01/02/2010
Figura 25. Regime de funcionamento da central principal no dia 02/02/2010.
Figura 26. Regime de funcionamento da central principal no dia 03/02/2010.
Figura 27. Regime de funcionamento da central principal no dia 04/02/2010
Figura 28. Regime de funcionamento da central principal no dia 05/02/2010.
Figura 29. Regime de funcionamento da central principal no dia 06/02/2010.
Figura 30. Regime de funcionamento da central principal no dia 07/02/2010

Figura 31. Monitoramento do Funcionamento do Compressor ZR-275.
Figura 32. Monitoramento do Funcionamento do Compressor ZR-275 no dia 24/12/2009.
Figura 33. Gráfico de Monitoramento de Operação Compressor ZR-5.
Figura 34. Gráfico de Funcionamento Compressor ZR-5 no dia 31/12/2009
Figura 35. Fluxo de Caixa x Taxas de Juros para investimento de compressores Planta SiC.
Figura 36. Composição percentual dos investimentos.
Figura 37. Fluxograma da Nova Central de Compressores Planta SiC 2012.
Figura 38. Casa da nova central de compressores instalada em 2012.
Figura 39. Gráfico medição vazão X potência da nova casa de compressores.
Figura 40. Sistema de gerenciamento inteligente de compressores
Figura 41. Sistema de modulação de pressão.
Figura 42. Gastos com Manutenção dos Compressores da Planta SiC
Figura 43. Disposição dos Secadores em Relação aos Compressores.
Figura 44. Disposição dos Secadores em Relação ao Vaso de Pressão e aos Filtros Coelescentes.
Figura 45. Vaso de Pressão da Instalação.
Figura 46. Filtro Coelescente com Purgador tipo Boia.
Figura 47. Orifício de Purga de Purgador Tipo Boia.
Figura 48. Drenagem Manual de Condensado da Linha de Ar Comprimido.
Figura 49. Filtro Colescente com Purgador Temporizado.
Figura 50. Sala de Compressores Planta SiC 2012.
Figura 51. Aberturas Realizadas na Central de Compressores 2012.
Figura 52. Secadores de Ar Planta SiC 2012.
Figura 53. Válvulas Gaveta Instalada em Substituição de Válvulas de Esfera.
Figura 54. Exaustão de Ar da Central de Compressores.
Figura 55. A configuração típica para recuperação de Ar aquecido em centrais de compressores.
Figura 56. Configuração de Reaproveitamento de Calor para Utilização em Chuveiros
Figura 57. 1: Boiler de Aquecimento de Água do Vestiário Central; 2: Informações Técnicas do Boiler do Vestiário Central.
Figura 58. Exemplo de Trocador de Calor Óleo/Água
Figura 59. Diagrama de um Trocador de Calor Óleo/Água
Figura 60. Fluxo de Caixa x taxa de Juros, para sistema com recuperação de energia
Figura 61. Modelo de Sistema de Gestão de Energia ABNT NBR ISO 50001

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Parâmetros avaliados em uma auditoria energética

Tabela 2. Priorização de recomendações (FUPAI/ELEKTRO, 2012).

Tabela 3. Características dos Compressores Instalados na Central Principal da Planta SiC de 2009 à 2010

Tabela 4. Dados Característicos da Central Principal.

Tabela 5. Dados do compressor ZR-275

Tabela 6. Dados de funcionamento do compressor ZR-275.

Tabela 7. Dados do compressor ZR-5

Tabela 8. Dados de funcionamento do compressor ZR-5

Tabela 9. Dados de Consumo Específico da Planta SiC 2010.

Tabela 10. Dados de Vazão da Planta SiC 2010

Tabela 11. Dados de Consumo Energético Planta SiC 2010

Tabela 12. Avaliação Inicial de Compressores (2010).

Tabela 13. Primeira Avaliação de Viabilidade Econômica

Tabela 14. Segunda Avaliação de Viabilidade Econômica.

Tabela 15. Terceira análise: Inclusão dos Investimentos Adicionais.

Tabela 16. Dados Característicos dos Compressores Rotativos de Parafuso e Variável Lubrificados das Marcas Ingersoll e Atlas Copco.

Tabela 17. Dados Característicos dos Compressores Parafuso e Variável Isentos de Óleo.

Tabela 18. Dados Característicos dos Periféricos Ingersoll, HB e Altas Copco

Tabela 19. Comparação Ingerssoll Rand x Atlas Copco.

Tabela 20. Custos com consumo de energia equipamentos Ingersoll Rand.

Tabela 21. Custos com consumo de energia equipamentos Atlas Copco.

Tabela 22. Avaliação econômica final.

Tabela 23. Comparação final, com custos de instalação e consultoria.

Tabela 24. Comparação final considerando o consumo específico de energia.

Tabela 25. Análise Econômica do Investimento para Aquisição de Compressores

Tabela 26. Dados dos Compressores Nirvana, 1, 2, 3 e 4 Planta SiC 2012

Tabela 27. Dados dos Secadores 1, 2, 3 Planta SiC 2012.

Tabela 28. Horas em Operação X Horas em Carga Central de Compressores 2012

Tabela 29. Comparação entre as Alternativas para Eliminação de Condensado.
Tabela 30. Consumo de GLP no ano de 2015.
Tabela 31. Análise de Viabilidade com Sistema de Recuperação de Calor.
Tabela 32. Atendimento aos ítens da norma ABNT ISSO 50001, planta SiC 2016

LISTA DE SÍMBOLOS

AC: Ar Comprimido;

kPa: Quilo Pascal;

PTFE: Politetrafluoretileno;

kW: Quilowatt;

cv: Cavalo Vapor;

m^3/h : Metro Cúbico Por Hora;

l/s : Litros por segundo;

hp: *Horse Power*;

PDCA: *Plan Do Check Act*;

k : multiplo de mil;

PROCEL: Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica;

SiC: Carbeto de Silício;

PET: Polietileno;

ton/a : toneladas por ano;

m^3/kWh : Metro Cúbico por Quilowatt hora;

MW: Megawatt;

A:Ampere;

m^3/min : Metro Cúbico por minuto;

pcm: pés cúbicos por minuto;

Nm^3/min: Normal Metro Cúbico por minuto;

kW/m^3: Quilowatt por Metro Cúbico;

Bar: Unidade de Pressão Atmosférica;

°C: Graus Célsius;

m^3: Metro Cúbico;

m: Metro;

mm: milímetro;

m^2/h: Metro Quadrado por Hora;

kgf/cm^2: Quilograma força por Centímetroquadrado;

kWh/m^3: Quilowatt hora por metrocúbico;

dB: decibel;

kg: Quilograma;

kW/m^2: Quilowatt por metro quadrado;

R$ / kWh: Reais por Quilowatt;

%%: Percetual;

v: Velocidade;

h: horas;

GLP: Gás Liquefeito de Petróleo;

kg/GLP : Quilograma por Gás Liquefeito de Petróleo;

EPC: Equipamento de Proteção Coletiva;

PCM: Pés Cúbicos por Minuto;

HP: Horário de Ponta;

TIR: Taxa Interna de Retorno;

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1

1. INTRODUÇÃO

1.2 JUSTIFICATIVAS DO TEMA

1.3 OBJETIVOS

1.4 ESTRUTURA

1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

CAPÍTULO 2

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 AR COMPRIMIDO

2.2 COMPRESSORES

2.2.1 COMPRESSORES DE DESLOCAMENTO POSITIVO

2.2.2 COMPRESSORES DINÂMICOS

2.2.3 COMPRESSORES ISENTOS DE ÓLEO

2.2.4 COMPRESSORES DE DIAFRAGMA

2.2.5 COMPRESSORES DO TIPO PARAFUSO

2.2.6 BOMBAS DE VÁCUO

2.3 CONFIGURAÇÕES TIPO *PACK* OU COMPONENTES INDIVIDUAIS

2.4 QUALIDADE DO AR COMPRIMIDO

2.4.1 FILTROS COALESCENTES

2.4.2 SECADORES

2.4.2.1 SECADORES DESSECANTES

2.4.2.2 SECADORES DE MEMBRANA

2.4.2.3 SECADOR POR REFRIGERAÇÃO

2.4.4 SELEÇÃO DE SECADORES DE AR

2.5 EQUIPAMENTOS QUE UTILIZAM AR COMPRIMIDO

2.5.1 MOINHOS A AR COMPRIMIDO

2.5.2 FILTROS DE DESPOEIRAMENTO

2.5.3 FERRAMENTAS PNEUMÁTICAS

2.5.4 VÁLVULAS E ATUADORES PNEUMÁTICOS UTILIZADOS NA PLANTA SIC

2.6 SISTEMAS DE AR COMPRIMIDO

2.6.1 ESPECIFICAÇÃO DO COMPRESSOR

2.6.2 SELEÇÃO DO NÚMERO DE COMPRESSORES

2.6.2.1 SISTEMAS DE COMPRESSOR CENTRALIZADO X DESCENTRALIZADO
2.7 SISTEMAS DE CONTROLE
2.7.1 SISTEMAS DE PARTIDA E PARADA
2.7.2 SISTEMA DE CARGA E ALÍVIO
2.7.3 SISTEMA DE CONTROLE DE FLUXO
2.7.4 CONTROLE ATRAVÉS DE VELOCIDADE VARIÁVEL
2.8 EFICIÊNCIA OPERACIONAL
2.9 AUDITORIA ENERGÉTICA
2.9.1 ABORDAGEM EM AUDITORIAS ENERGÉTICAS
CAPÍTULO 3
3 METODOLOGIA
3.1 ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA
3.1.1 UTILIZAÇÃO DO AR COMPRIMIDO NA INSTALAÇÃO
3.1.2 AUDITORIA INICIAL
3.1.2.1 AUDITORIA REALIZADA EM 2010
3.1.2.2 CENTRAL PRINCIPAL EM 2010
3.1.2.3 COMPRESSOR ZR 275
3.1.2.4 COMPRESSOR ZR-5
3.1.3 DADOS CONSOLIDADOS
3.1.3.1 PREMISSAS INICIAIS PARA O NOVO ESTUDO DO SISTEMA DE AR COMPRIMIDO
3.1.3.2 ESTUDOS TÉCNICOS INICIAIS
3.1.3.3 ESTUDOS DE VIABILIDADE ECONÔMICA
3.2 RESULTADOS E DISCUSSÃO
3.2.1 NOVA CENTRAL DE COMPRESSORES (2012)
3.2.2 SEGUNDA AUDITORIA ENERGÉTICA
3.2.3 MANUTENÇÃO
3.2.4 MELHORIAS
CAPÍTULO 4
4 RECUPERAÇÃO DE ENERGIA
4.1 APLICAÇÃO DA NORMA ABNT NBR ISO 50001
CAPÍTULO 5
5 CONCLUSÃO
5.1 REFERÊNCIAS

Capítulo 1

1.1. INTRODUÇÃO

Atualmente, no cenário mundial há uma alta competitividade e uma preocupação constante com as mudanças climáticas, desencadeando uma busca por eficiência energética em processos de geração, distribuição de energia e equipamentos.

No setor industrial a busca por eficiência também é importante, principalmente, com a implementação do *Lean Manufacturing* (Sistema Toyota de Produção), que normatiza os sete desperdícios que devem ser avaliados no setor produtivo. Um exemplo é o emprego além do necessário da energia elétrica, que pode ser entendido como o uso não eficiente na produção, aumentando os custos, e, consequentemente, reduzindo os lucros e a competitividade das empresas (OHNO, 1988).

A escolha e seleção de equipamentos mais eficientes, é um fator decisivo na busca de redução de perdas. Em diversos países como Canadá, Alemanha e Estados Unidos (CLASP, 2008), os equipamentos e instalações são classificados de acordo com a sua eficiência energética. No Brasil, produtos como veículos automotores, eletrodomésticos, lâmpadas, motores elétricos, coletor solar e instalações comerciais, públicas e residenciais, dentre outros, já são avaliados quanto a sua eficiência energética, e recebem um selo que varia de A a E, sendo que, com o selo A o aparelho possui uma maior eficiência energética e o E menor eficiência energética (INMETRO, 2014).

O consumo de energia elétrica no setor industrial brasileiro representa 50% do consumo total, onde as cargas motrizes correspondem a 55% do consumo elétrico industrial e 25% do consumo da energia elétrica distribuída no Brasil (ELEKTRO, 2015). 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 *et al.*, 2000), inferindo uma alta relevância à utilização e geração do ar comprimido (AC), e, consequentemente, a operação eficiente destes equipamentos.

1.2 JUSTIFICATIVAS DO TEMA

O ar comprimido (AC) 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.

Na avaliação da eficiência energética de sistemas de ar comprimido, são consideradas as perdas tanto na geração e armazenamento, quanto na distribuição e utilização final. As perdas podem ocorrer, pelo dimensionamento incorreto das instalações, parâmetros de operação inadequadamente selecionados, manutenções incorretas ou não realizadas, vazamentos, perda de calor na própria geração de ar-comprimido, sistema de distribuição com perdas de carga (ROLLINS, 2004; ROCHA *et al.*, 2005).

Em (PERRONE *et al,* 2001) são avaliados potenciais de economia energética com compressores na geração, distribuição e uso final em uma industria automobilística, concluindo que, a perda decorrente de vazamentos é a mais significativa, sendo cerca de 40% do total.

Segundo (GORELICK, 2008) é importante a identificação dos vazamentos para aumentar a eficiencia energética do sistema e reduzir custos.

Os vazamentos em sistema de AC são a principal perda relacionada à distribuição de AC 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 e o calor dissipado durante o processo de geração de AC são as principais perdas identificadas e também aquelas com maior potencial de retorno financeiro. Porém, outras medidas com custos extremamente baixos de implantação podem ser tomadas, como a redução da pressão a um limite usual mínimo, redução quando possível do consumo de AC e gerenciamento da produção de AC do parque de compressores (SAIDUR *et al*., 2010).

Outra perda que também deve ser analisada é a admissão de ar dos compressores acima da temperatura ambiente devido ao mau dimensionamento da sala de compressores, reduzindo a eficiência volmêtrica dos mesmos. (SAIDUR *et al*., 2010).

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).

1.3 OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo avaliar a aplicação da ferramenta auditoria energética, bem como sua viabilidade técnica e econômica de uma intalação de ar comprimido. Foram realizadas avaliações de duas audtitorias realizadas, a viabilidade técnica e econômica da substituição e atualização do sistema de geração de ar comprimido. Bem como a avaliação de melhorias em sistemas de gerenciamento de compressores, manutenção do sistema e a avaliação técnica e econômica do sistema da implemtenção de um sistema de recuperação de calor para aquecimento de água e secagem de grãos.

Inicialmente, foi realizada uma auditoria energética no sistema de ar comprimido de uma Planta Industrial de Carbeto de Silício (SiC) situada em Minas Gerais na região do Campo das Vertentes. Em seguida, foram propostas melhorias para o sistema e realizado um estudo de viabilidade econômica.

Depois da etapa de implantação das melhorias sugeridas, foi realizada em 2012 uma segunda auditoria para verificar o resultado das ações efetuadas e propor novas soluções aos pontos identificados como ainda não eficientes.

A planta analisada tem uma produção atual de 100.000 toneladas/ano (ton/a) de SiC, sendo responsável pela produção primária e beneficiamento.

Na última etapa é avaliada a adoção da norma NBR ABNT ISO 50001 na unidade fabril estudada como forma de garantir a evolução no gerenciamento energético.

1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação é constituída por cinco capítulos que são apresentados a seguir. O capítulo atual contextualiza a importância da eficiência energética no meio industrial com relação a sistemas de AC, bem como apresenta a auditoria energética como ferramenta para aumentar a competitividade.

No Capítulo 2 são apresentados os conceitos de ar comprimido, a revisão de compressores e auditoria energética em instalações e suas aplicações.

No Capítulo 3 é apresentada a metodologia utilizada no presente trabalho, bem como um estudo de caso de uma auditoria energética aplicada em uma indústria química, com as análises das propostas e pontos de potenciais melhorias nas instalações, que não foram identificados na auditoria do ano de 2012.

Uma alternativa de utilização de recuperação de energia térmica é apresentada no capítulo 4, no qual são avaliadas as possíveis aplicações para o calor gerado durante o processo de compressão. Também é avaliada a aplicação da norma ABNT NBR ISO 50001 na instalação estudada.

Finalmente, no Capítulo 5 são apresentadas as conclusões do estudo, com a avaliação das melhorias potenciais, recuperação de energia e a utilização da norma ABNT NBR ISO 50001 como forma de garantir a continuidade do aumento de eficiência energética em instalações industriais.

Capítulo 2
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 AR COMPRIMIDO

O ar atmosférico é abundante na atmosfera, sendo constituído de aproximadamente 78% de Nitrogênio, 21% de Oxigênio e 1% de outros gases. Sua pressão ao nível do mar é de 101325 Pa. Sendo um fluído com grande disponibilidade, a sua forma comprimida (com aumento da pressão em relação à pressão atmosférica local) é uma fonte de energia importante na indústria (ATLAS COPCO, 2015).

O custo total para trabalhar com AC inclui o custo das instalações, reparo e manutenção do equipamento, bem como mão-de-obra de operação e manutenção, sendo que 95% do custo total correspondem somente à mão-de-obra e encargos trabalhistas; e os 5% restantes correspondem aos custos relacionados propriamente com o AC. Sendo assim, o custo do AC e suas ferramentas pneumáticas são considerados insignificantes quando comparado à economia obtida a partir do seu uso nas instalações industriais (ROLLINS, 2004).

Para conseguir os benefícios e vantagens na utilização do AC, é essencial um bom planejamento para o desempenho e eficiência adequados do sistema. Para que isto ocorra, é necessário que os equipamentos, *layout* e instalações, sejam perfeitamente dimensionados e mantidos em condições apropriadas de operação (ROLLINS, 2004). Além disso, a qualidade do AC deve atender aos requisitos mínimos necessários, sem comprometer as suas características ou dos equipamentos que requerem seu uso. Esta especificação deve envolver também o dimensionamento dos secadores do sistema. Outro ponto importante é a perda de carga no tratamento do AC, que reduz a eficiência de sua distribuição. Para sanar este problema, resevatórios grandes e sistemas de distribuição de AC em forma de anel devem ser utilizados, impedindo os ciclos desnecessários de partida e parada dos compressores (KENT, 2012).

Um sistema de AC possui componentes essenciais; um ou mais compressores, uma fonte de alimentação, um sistema de controle, um filtro de admissão, um resfriador posterior com um separador de condensado, um reservatório de ar, um secador de ar, tubulações de interconexão e um sistema de distribuição do ar (ROLLINS, 2004).

O sistema de AC tem como objetivo fornecer ar para vários pontos de aplicação com quantidade e qualidade estabelecida, e com pressão adequada para operação das ferramentas pneumáticas e outros equipamentos a AC. É importante ressaltar que, deve ser feita uma investigação sobre todas as aplicações conhecidas e prováveis antes da determinação da quantidade requerida de AC, pois ampliações não planejadas causam perda de eficiência na geração (ROLLINS, 2004). Várias questões devem ser analisadas para o dimensionamento de uma central de fornecimento de AC, tais como, volume, pontos que devem ser atendidos, qualidade definida para o processo. No caso do tratamento do AC, não só a umidade deve ser levada em consideração, mas também os contaminantes que podem influenciar na sua utilização (ATLAS COPCO, 2015).

2.2 COMPRESSORES

Os compressores são os dispositivos que captam ar ou gás e aumentam a sua pressão através da realização de trabalho. De acordo com as leis da termodinâmica, o gás ou o ar podem ser comprimidos isentropicamente ou isotermicamente. Na realidade, o ar raramente é usado logo depois da compressão, sendo necessário armazena-lo e distribuí-lo por linhas de tubulações (ATLAS COPCO, 2010).

Existem dois tipos principais de compressores de ar, os compressores de deslocamento positivo e os dinâmicos. Os compressores de deslocamento positivo são os mais comuns na indústria (ROLLINS, 2004), sendo estes, dispositivos que confinam o gás ou ar em recipientes reduzindo seu volume e aumentando a sua pressão (ATLAS COPCO, 2015).

Nos compressores de deslocamento positivo o ar é deslocado para uma câmara onde é realizado o trabalho de compressão do volume (ROLLINS, 2004).

Em compressores dinâmicos o ar é impelido e acelerado a alta velocidade, e é descarregado em um difusor, no qual a energia cinética é transformada em pressão estática (ATLAS COPCO, 2010).

2.2.1 COMPRESSORES DE DESLOCAMENTO POSITIVO

Um dos compressores de deslocamento positivo é o de cilindro de simples efeito como mostrado na Figura 1, sendo muito similar ao motor de combustão interna. Ao iniciar o ciclo a

válvula de admissão é aberta preenchendo toda a câmara com ar. Após o fechamento da válvula de admissão, o deslocamento da biela provoca uma redução no volume da câmara, e no ponto de máxima pressão a válvula de exaustão é aberta e o ciclo é reiniciado. A taxa de compressão é definida como a relação entre os valores de pressão admitida e da dissipada (ATLAS COPCO, 2010).

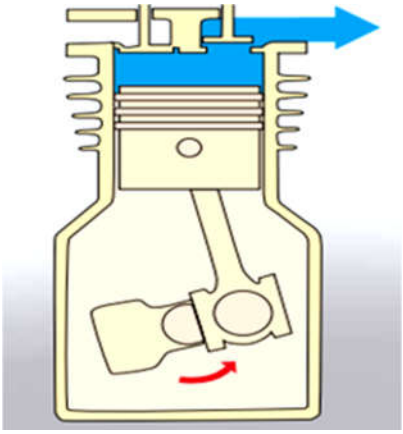


Figura 1. Compressor de Cilindro de Simples Efeito.

Fonte: ATLAS COPCO, 2015.

O modelo mais antigo e ainda um dos mais utilizados é o compressor a pistão, que pode ter as mais diversas configurações e até mesmo ser isento de óleo. Dentre os modelos a pistão as configurações mais comuns de pequena dimensão são os bi-cilindrico em “V”, como mostrado na Figura 2 (ATLAS COPCO, 2015).

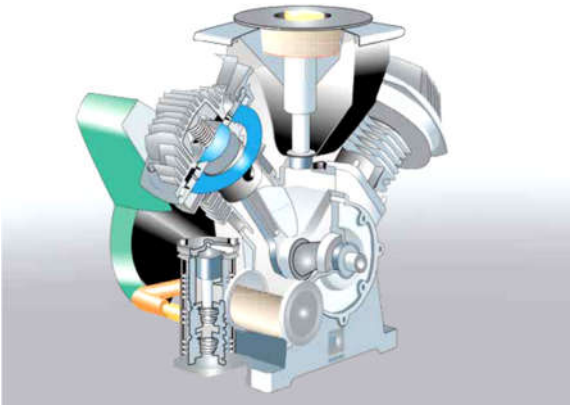


Figura 2. Compressor de Descolamento Positivo a Pistão.

Fonte: ATLAS COPCO, 2015.

2.2.2 COMPRESSORES DINÂMICOS

Nos compressores do tipo dinâmico apresentado na Figura 3, a pressão aumenta devido ao fluxo de ar. O fluxo de ar é acelerado a altas velocidades pelas pás do impelidor e direcionado a um difusor. Dependendo da direção do difusor podem ser denominados compressores radiais ou axiais. Em relação aos compressores de deslocamento positivo possuem pressão baixa de operação e alta vazão (ATLAS COPCO, 2010).

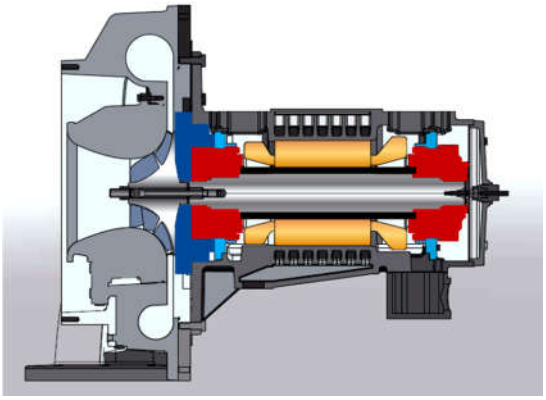


Figura 3. Compressor Dinâmico do Tipo Centrífugo

Fonte: ATLAS COPCO, 2015.

2.2.3 COMPRESSORES ISENTOS DE ÓLEO

Em determinadas aplicações, as câmaras de compressão de AC não podem ser lubrificadas, e por isso tem aumentado a demanda por compressores isentos de óleo como o da Figura 4, principalmente em aplicações instrumentais e em processos nos quais o ar entra em contato com alimentos, fármacos ou componentes elétricos (ROLLINS, 2004; ATLAS COPCO, 2010).

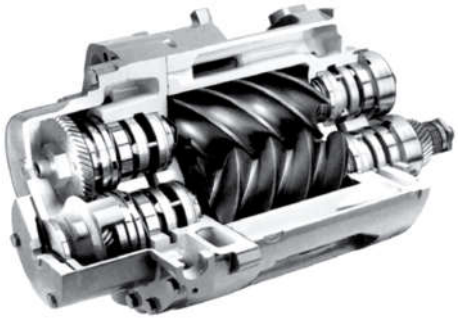


Figura 4. Compressor Tipo Parafuso Isento de Óleo.

Fonte: CAGI, 2003.

Os compressores isentos de óleo possuem anéis de vedação de politetrafluoretileno (PTFE) ou carbono, e alternativamente as válvulas são isoladas através de labirintos, sendo as máquinas seladas e vedadas (ATLAS COPCO, 2010).

São disponíveis também, compressores rotativos dos tipos parafuso e lóbulos, os quais dispensam a lubrificação da câmara de compressão. Compressores de ar centrífugos são isentos de óleo devido sua própria configuração (ROLLINS, 2004; ATLAS COPCO, 2010).

Os compressores não lubrificados têm custo elevado em função do projeto e materiais empregados na sua fabricação. Compressores recíprocos não lubrificados tendem a ter maiores custos de operação em função de custos de manutenção associados à vida curta das válvulas e anéis de pistão (ROLLINS, 2004).

2.2.4 COMPRESSORES DE DIAFRAGMA

Os compressores de diafragma podem ser mecânicos ou hidráulicos. Os compressores com diafragma mecânico são utilizados em locais que demandam baixa vazão e baixa pressão ou bombas de vácuo. Os com diafragmas hidráulicos são utilizados quando existe a demanda por alta pressão (ATLAS COPCO, 2010).

2.2.5 COMPRESSORES DO TIPO PARAFUSO

O compressor tipo parafuso como o da Figura 5, possui uma alta vazão e uma faixa ampla de pressão de trabalho (ROLLINS, 2004). Os parafusos constituem-se de dois rotores, um macho e um fêmea, e durante a rotação de um contra o outro, o ar é direcionado entre os parafusos provocando a redução do volume como exemplificado na Figura 6 (ATLAS COPCO, 2010).

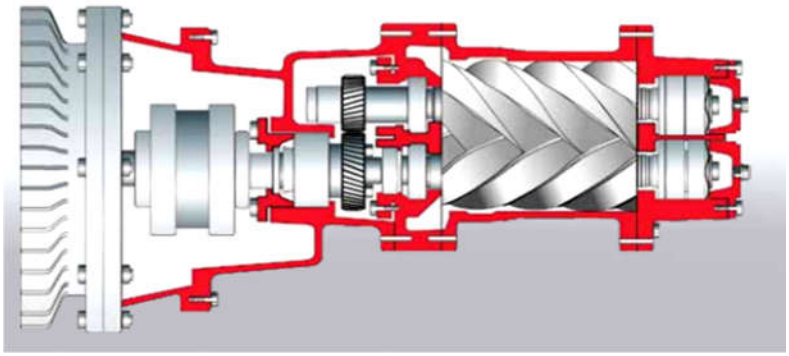


Figura 5. Compressor tipo parafuso.

Fonte: ATLAS COPCO, 2015.

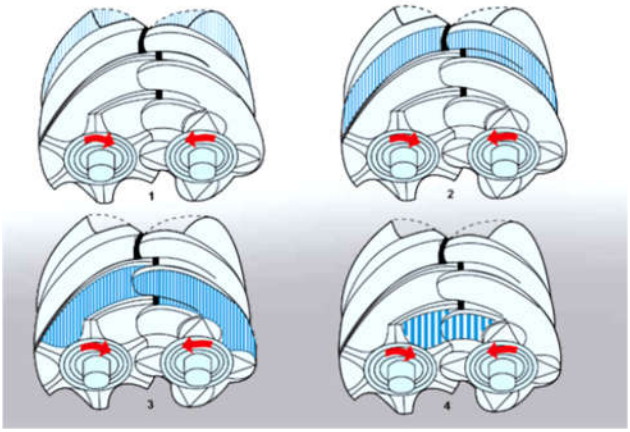


Figura 6. Ciclo de Compressão de um Compressor do Tipo Parafuso. 1 – Admissão e 2 a 4 compressão gradual do ar.

Fonte.: ATLAS COPCO, 2015.

2.2.6 BOMBAS DE VÁCUO

Compressores que geram uma diferença de pressão abaixo da pressão atmosférica são chamados de bombas de vácuo, e operam com taxas elevadas de compressão (ROLLINS, 2004).

2.3 CONFIGURAÇÕES TIPO *PACK* OU COMPONENTES INDIVIDUAIS

Compressores acima de 18,6 kilowatt (kW) (25 cavalo vapor (cv)) eram vendidos individualmente e montados no local de instalação. Atualmente, existem compressores de ar do tipo *pack* que consistem em uma unidade completa montada sobre uma estrutura, e que são os preferidos pelos usuários (ROLLINS, 2004).

A desvantagem de compressores instalados individualmente é que em caso de alteração do local de instalação do compressor o investimento pode ser irrecuperável. Desta forma, torna-se viável, a aquisição de um módulo completo de um único fornecedor, o que simplifica o processo de aquisição e montagem. Outra vantagem é que, como conjunto único o compressor tipo *pack* dispensa alguns cuidados e inspeções de manutenção necessárias em outras configurações (ROLLINS, 2004).

2.4 QUALIDADE DO AR COMPRIMIDO

O ar atmosférico contém vapor de água à alta e baixa temperatura, além de impurezas, tais como poeira e fuligem. A concentração volumétrica de água quando o AC é comprimido se torna imcompressíel no momento que ocorre a condensação. A precipitação de água nas

tubulações e equipamentos que utilizam AC é indesejável, e para garantir que o ar esteja isento de água são utilizados métodos de secagem do ar (ATLAS COPCO, 2010).

A temperatura de orvalho é a temperatura em que água contida no AC inicia o processo de condensação. Valores baixos de temperatura de orvalho significam que há pequena quantidade de água no ar atmosférico (ROLLINS, 2004).

A escolha correta da forma de garantir a qualidade do AC é importante para a economia de energia elétrica e redução dos custos operacionais. Um ponto de extrema importância é o levantamento dos requisitos minimos de qualidade, pois quanto maior o nível de qualidade do AC, maiores são os custos envolvidos em sua geração. Outro ponto a ser lembrado é que para cada adição de um dispositivo para o tratamento, há o aumento dos custos de instalação, bem como a perda de carga do sistema.

Dentre as formas de tratamento a de maior custo é a secagem do AC para eliminação da água residual. Atualmente, os sistemas de secadores por refrigeração são os que apresentam a melhor relação custo beneficio, sendo que os secadores dessecantes e de membrana são alternativas ao modelo de refrigeração (PLANT ENGINEERING, 1994).

2.4.1 FILTROS COALESCENTES

Filtros coalescentes são geralmente instalados após o *aftercooler*, e auxiliam na proteção do sistema de AC, e usualmente são usados para a primeira etapa da filtragem, removendo contaminantes e particulados (FISH, 2014).

O *aftercooler* é um sistema que trata o AC e reduz sua temperatura em níveis próximos a do ambiente, pois depois de uma compressão a temperatura pode chegar, em alguns casos, a 200ºC (ABERKO, 2014).

Os filtros coalescentes possuem alta eficiência chegando a remover 93% dos contaminantes, embora requeiram atenção quanto a purga, bem como uma substituição correta após o seu desgaste (FISH, 2014).

2.4.2 SECADORES

Os secadores de ar são projetados para remover praticamente todos os traços de vapor de água no AC. Existem vários tipos, sendo os principais os de membrana e os por refrigeração (FISH, 2014).

2.4.2.1 SECADORES DESSECANTES

Os secadores dessecantes são filtros onde o AC encontra-se a temperaturas negativas, atingindo valores próximos a - 40° C, sendo uma alternativa interessante quando o resfriamento de ar não é problema para o processo. Filtros dessecantes são geralmente compostos por duas torres que contêm o material de absorção de umidade. O ar saturado é secado quando passa por duas torres, e após, é encaminhado à segunda torre, na qual é finalizada a secagem como mostrado na Figura 7. Os sistemas dessecantes com ou sem resfriamento do ar são semelhantes. Dessecantes por calor têm um consumo elevado de energia elétrica. Em contraste, secadores dessecantes que removem calor não requerem uma quantidade significativa de energia elétrica, contudo descarregam uma quantidade pequena de AC (FISH, 2014).

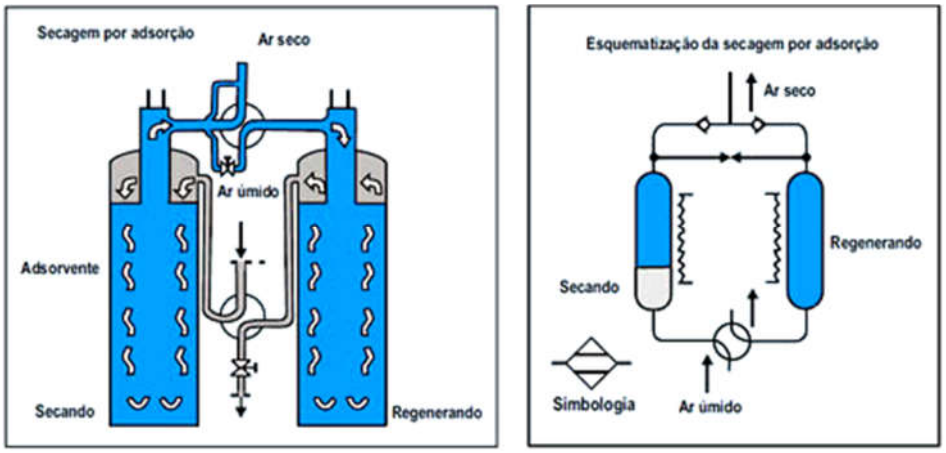


Figura 7. Esquema de Funcionamento de Secadores Dessecantes.

Fonte: PNEUMATIK, 2008.

2.4.2.2 SECADORES DE MEMBRANA

Secadores de membrana como o apresentado na Figura 8, assim como os secadores dessecantes, podem reduzir a temperatura do ar em 40°C, e são constituídos por tubos contendo um material de membrana que é permeável ao vapor de água. O AC passa por entre as fibras da membrana e o vapor de água fica retido, e, portanto, na saída tem-se o ar seco (FISH, 2014).

Secadores de membranas não possuem partes móveis, não consomem energia elétrica e podem ser operados a baixo custo. O filtro de membranas deve ser trocado uma vez por ano, e são secadores ideais para áreas terminais ou isoladas (FISH, 2014).

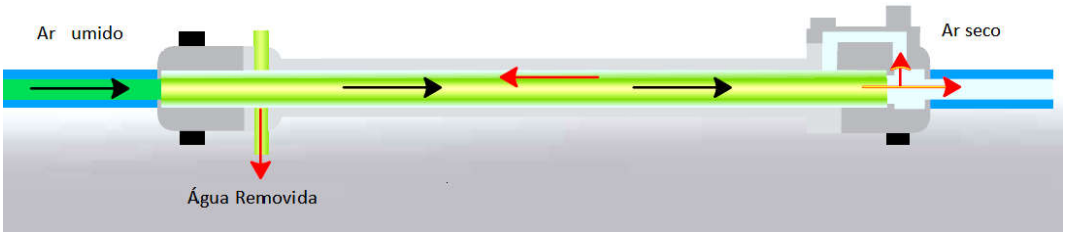


Figura 8. Esquema de Funcionamento de Secador de Membrana.

Fonte: ADAPTADO DE ATLAS COPCO, 2015.

2.4.2.3 SECADOR POR REFRIGERAÇÃO

Secadores de ar por refrigeração resfriam o ar abaixo do ponto de orvalho, de forma que o vapor de água seja condensado, e após isto, o ar é aquecido na saída e separa o vapor de água do AC como exemplificado na Figura 9 (FISH, 2014). Neste tipo de secador a temperatura do AC fica entre 2°C e 10° C, sendo que os secadores modernos funcionam com fluidos de trabalho que cumprem as normas relativas à poluição ambiental (ATLAS COPCO, 2015).

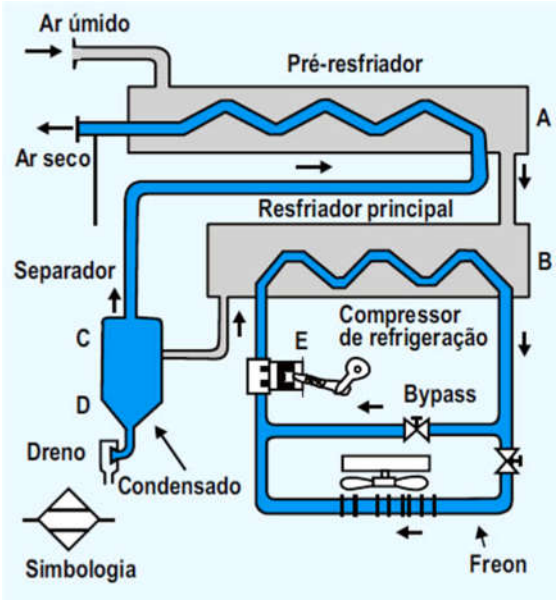


Figura 9. Esquema de Funcionamento de um Secador Tipo Refrigeração.

Fonte: PNEUMATIK, 2008.

2.4.4 SELEÇÃO DE SECADORES DE AR

A seleção dos secadores de ar leva em consideração a condição de entrega do AC no uso final para que não sejam desperdiçados recursos com um ar de qualidade muito superior à

necessária. Outros pontos que devem ser verificados são a temperatura de entrega de ar e as condições ambientais da instalação, e por último os custos de aquisição, manutenção e operação para que o sistema seja sustentável (FISH, 2014).

2.5 EQUIPAMENTOS QUE UTILIZAM AR COMPRIMIDO

A seguir, são apresentados alguns equipamentos que operam com AC.

2.5.1 MOINHOS A AR COMPRIMIDO

Moinhos a AC como mostrado na Figura 10, são equipamentos empregados para a obtenção de partículas finas, e utilizam o método de classificação aérea para separação dos grãos grossos dos finos na câmara de processo. O equipamento é abastecido com grãos de tamanho reduzido que passaram por outros processos de cominuição e são armazenados em uma câmara onde bicos de ar comprimido impulsionam os grãos uns contra os outros. Os moinhos a AC têm na sua parte superior os classificadores aéreos, que só permitem a passagem dos grãos mais finos de acordo com a velocidade de rotação (KURIMOTO, 2015).

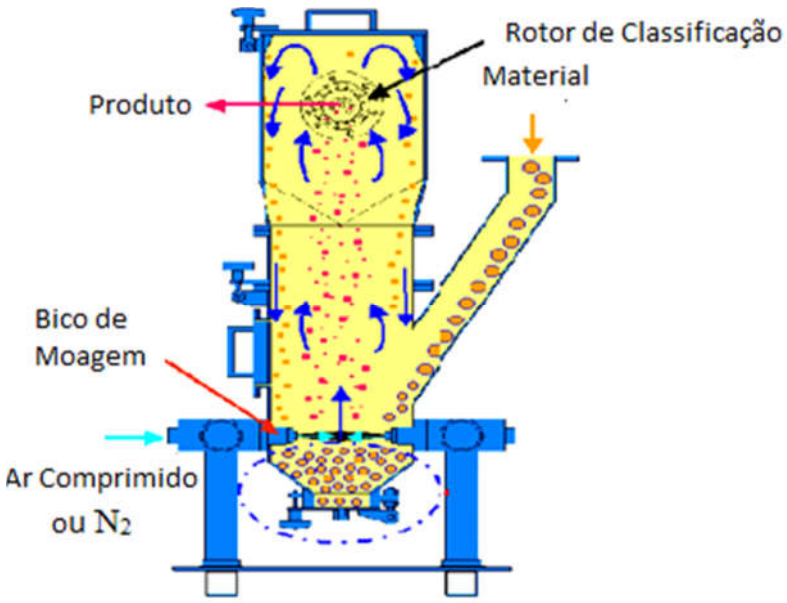


Figura 10. Moinho a Ar Comprimido.

Fonte: ADAPTADO DE KURIMOTO, 2015.

2.5.2 FILTROS DE DESPOEIRAMENTO

Os filtros de despoeiramento apresentados na Figura 11 correspondem a um tipo de Equipamento de Proteção Coletiva (EPC), e captam os particulados gerados durante o processo

de cominuição. Um exaustor é utilizado para captar o ar do ambiente através de mangas de poliéster, como mostrado na Figura 12, ou por cartuchos revestidos de poliéster que devem ser limpos através de jatos de ar comprimido. Os resíduos captados pelos mesmos são destinados a *Bag's* (sacolas de uma tonelada) de coleta e retornam ao processo como produto. Na Figura 13 é apresentado um diagrama ilustrativo do despoeiramento (VENTEC, 2008).



Figura 11. Filtro de Despoeiramento GW Equipamentos.

Fonte: GW EQUIPAMENTOS, 2015.

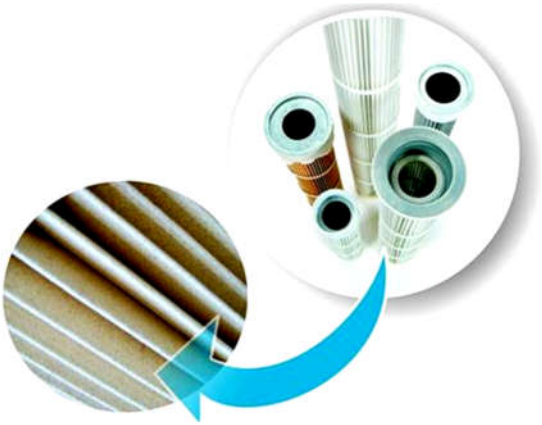


Figura 12. Mangas Plissadas.

Fonte: GW EQUIPAMENTOS, 2015.

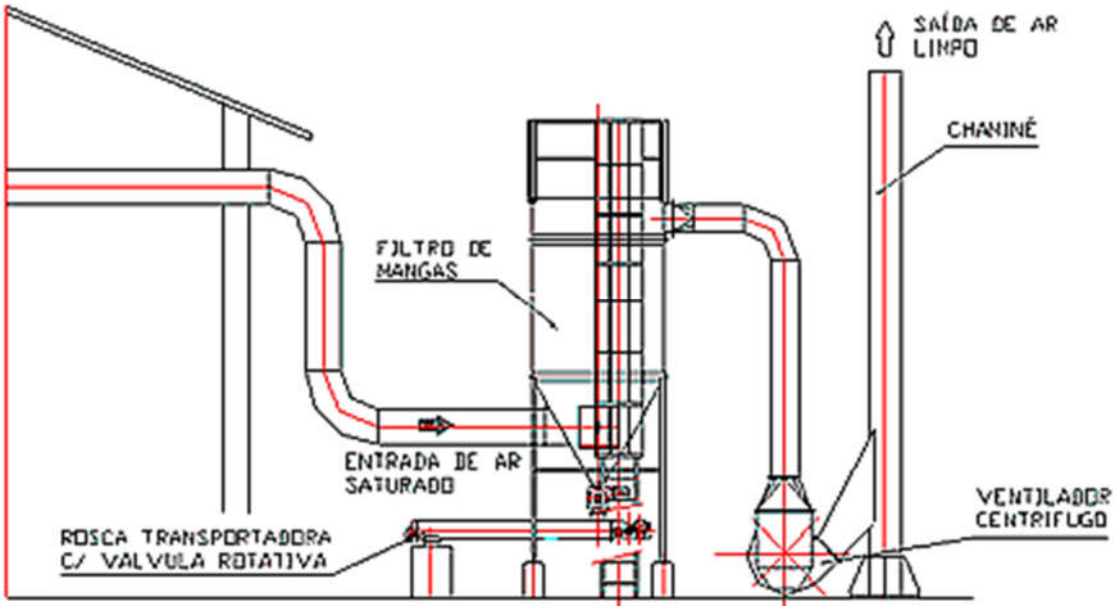


Figura 13. Diagrama Ilustrativo do Despoeiramento.

Fonte: GW EQUIPAMENTOS, 2015.

2.5.3 FERRAMENTAS PNEUMÁTICAS

O AC pela sua grande versatilidade permite a utilização de ferramentas mais leves e práticas, como a pistola para pintura e limpeza mostrada na Figura 14. Em atividades que demandam agilidade no aperto de parafuso também é utilizada chave pneumática de impacto como a da Figura 15 (ROLLINS, 2004).



Figura 14. Pistola de Pintura.

Fonte: ATACADÃO DAS FERRAMENTAS, 2015.



Figura 15. Chave de Impacto Ingersoll Rand.

Fonte: INGERBRAS, 2015.

2.5.4 VÁLVULAS E ATUADORES PNEUMÁTICOS UTILIZADOS NA PLANTA SIC

As válvulas pneumáticas são dispositivos que direcionam o AC para determinados pontos, efetivando os circuitos de AC. Atuadores pneumáticos são dispositivos que convertem energia pneumática em energia mecânica. Alguns destes dispositivos são mostrados na Figura 16 (ROLLINS, 2004).



Figura 16. Cilindros e Atuadores Pneumáticos.

Fonte: STANK AUTOMAÇÃO, 2014.

2.6 SISTEMAS DE AR COMPRIMIDO

Em sistemas de AC várias características são importantes e devem ser analisadas previamente. Alguns pontos que devem ser analisados cuidadosamente são: capacidade do compressor; determinação do número de compressores; localização dos compressores; determinação dos requisitos de qualidade doe AC, determinação da configuração dos compressores, p*ack* ou individuais; sistema de regulagem de demanda de AC; projeto dos sistemas de distribuição de AC; localização e capacidade de armazenamento do ar; *layout* da tubulação de admissão e descarga; avaliação da necessidade de resfriador posterior e do separador de condensadores e sua capacidade (ROLLINS, 2004). Outro detalhe a ser observado, além das questões relacionadas às especificações técnicas, é a possibilidade de futura ampliação da central de geração de AC (ATLAS COPCO, 2015).

Em WAMSLEY (2015) são relacionadas as características não verificadas na análise da capacidade da central de AC quando da expansão de equipamentos que demandam AC. Estes equívocos podem gerar custos e perda de eficiência, tais como, trabalhar com pressões e temperaturas acima do recomendado e diminuição da eficiência do sistema de tratamento do AC.

Na análise de viabilidade econômica, diversos fatores são considerados, e dentre estes estão os custos de instalação, obras civis e o da consultoria para avaliação de desempenho. De acordo com a Figura 17, o consumo de energia representa 76% dos custos totais na instalação do sistema de AC e as instalações e manutenção cada uma 12% (CAPELLI, 2007).

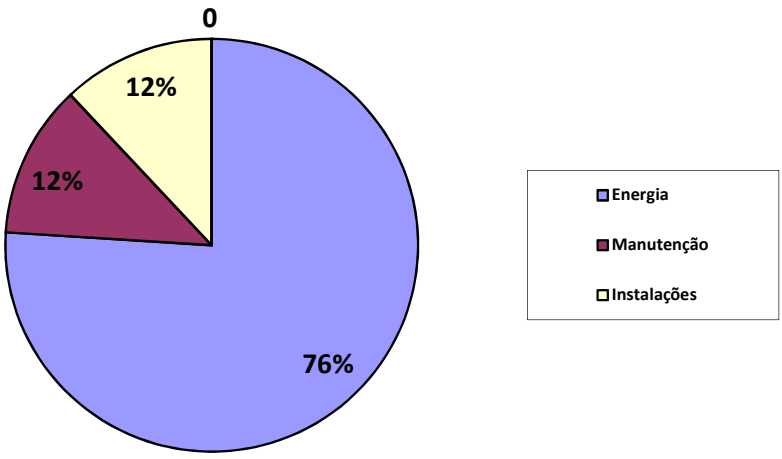


Figura 17. Custos Envolvidos na Instalação de Ar Comprimido.

Fonte: ADAPTADO DE CAPELLI, 2007.

2.6.1 ESPECIFICAÇÃO DO COMPRESSOR

A capacidade do compressor é considerada uma questão vital e básica. Em estudos em indústrias com dispositivos operados por AC, verifica-se que os componentes desses dispositivos operam continuamente, enquanto outros operam ocasionalmente. Mas, esses últimos podem em operação necessitar de uma grande quantidade de ar (ROLLINS, 2004).

O ponto de partida para determinar o sistema de AC é a pressão exigida. A instalação deve ser capaz de fornecer a máxima pressão requerida, levando em consideração fatores como perda de carga em acessórios e tubulações (ATLAS COPCO, 2015).

A quantidade real de ar utilizada por esses dispositivos pode variar consideravelmente em diferentes aplicações. Por este motivo, é necessário calcular o consumo médio de cada dispositivo, para determinar a quantidade real de ar utilizada, e também deve constar um volume de armazenagem suficiente para atender aos picos de demanda (ROLLINS, 2004). Ou alternativamente, instalar compressores isolados em determinados locais para suprir demandas específicas (ATLAS COPCO, 2015).

O consumo médio pode ser determinado empregando o conceito do fator de carga. Os dispositivos pneumáticos operam de modo intermitente e muitas vezes com capacidade menor do que a total. O fator de carga é conhecido como a relação, em porcentagem, entre o consumo real de ar e o consumo máximo contínuo com carga total, medido em metros cúbicos por hora (m^3/h) ou pés cúbicos por minuto (PCM). Portanto, é essencial determinar ou estimar o fator de carga para o cálculo da capacidade de AC da instalação (ROLLINS, 2004).

Para determinação do número de compressores fatores econômicos e aspectos relacionados à flexibilidade do sistema devem ser considerados, pois, uma instalação que possui poucas máquinas pode apresentar problemas na disponibilidade de AC no caso de manutenções (ATLAS COPCO, 2015).

Para a definição do fator de carga, dois parâmetros são necessários. O primeiro é o fator tempo, que corresponde à porcentagem do tempo total de trabalho durante a utilização real do dispositivo. O segundo é o fator trabalho, que corresponde à porcentagem necessária de ar para a operação adequada do dispositivo. Portanto, o fator carga é o produto dos fatores tempo e trabalho (ROLLINS, 2004).

A capacidade de um sistema é mais fácil de ser estimada do que a capacidade de uma nova instalação, pois a experiência indicará o fator carga para diferentes dispositivos na instalação. Em geral, é possível determinar com confiabilidade uma proporção entre a carga absorvida pelo compressor e a carga que um novo compressor absorverá (ROLLINS, 2004). Se

não for disponibilizado o histórico de funcionamento dos compressores, valores padronizados por segmento industrial são disponibilizados na literatura técnica (ATLAS COPCO, 2015).

2.6.2 SELEÇÃO DO NÚMERO DE COMPRESSORES

Um dos pontos a serem abordados após o levantamento da demanda de AC é a forma de atendimento, e uma das formas de aperfeiçoar o sistema é a instalação de reservatórios de AC para atender os horários de pico (ROLLINS, 2004).

Vazamentos geram custos e devem ser reduzidos ao mínimo, e por isso é comum, adicionar aproximadamente dez por cento ao consumo estimado. As tubulações podem ser mantidas sem vazamentos, porém, é difícil que o projetista tenha controle sobre a sua manutenção, e por isso, é recomendada a inclusão de 5 a 10% de tolerância relativa a vazamentos (ROLLINS, 2004). Os vazamentos devem ser considerados como um percentual do fator de carga no projeto da instalação (ATLAS COPCO, 2015).

Devem ser consideradas as várias possibilidades de uso de AC, mesmo as futuras, projetando um *layout* flexível para uma eventual expansão da indústria (ATLAS COPCO, 2015).

2.6.2.1 SISTEMAS DE COMPRESSOR CENTRALIZADO X DESCENTRALIZADO

Antes da definição entre um sistema de AC centralizado ou descentralizado com múltiplas unidades, devem ser considerados vários fatores. Para que estes fatores sejam considerados, é necessária a análise e a avaliação dos responsáveis pela instalação do AC (ROLLINS, 2004).

Normalmente, a eficiência dos compressores de grande capacidade é maior do que em máquinas menores. Mas, em compensação, unidades menores que são resfriadas a ar possibilitam uma economia maior de água em sua tubulação, e são mais adaptáveis em situações com variação elevada do consumo (ROLLINS, 2004; SAIDUR *et al*., 2010).

Uma fábrica eventualmente tem necessidades específicas, por exemplo, pode dispor de uma central que gera AC a 7 Bar e pode ter equipamentos que necessitem de AC a 20 Bar. Por este motivo, o uso de compressores do tipo único e não conectado com o restante do sistema de ar em algumas aplicações, é mais prático e econômico (ROLLINS, 2004).

A principal vantagem de um sistema descentralizado é a sua flexibilidade. Em uma instalação onde futuras expansões físicas não são previstas, unidades de pequena capacidade podem ser adquiridas de acordo com a necessidade, fornecimento e demanda adicional de ar. Quando a condição econômica não permite o financiamento de um sistema grande de AC, a instalação de um sistema com unidades múltiplas é considerada vantajosa, e deve ser projetado

considerando a expansão do sistema. Contudo, nesse caso deve ser considerada a vantagem do agrupamento, pois os custos da instalação das unidades múltiplas podem ser reduzidos, principalmente com a energia elétrica e água, quando os compressores são instalados juntos (ROLLINS, 2004).

A instalação de uma central de produção de AC de forma centralizada tem diversas vantagens. Do ponto de vista econômico, os custos das máquinas e acessórios tendem a ser mais baratos. Aspectos ambientais como controle de ruído e mesmo pontos de admissão de ar são facilmente controlados neste tipo de instalação. Existe também a possibilidade de recuperação eficiente do calor gerado na compressão (ATLAS COPCO, 2015).

2.7 SISTEMAS DE CONTROLE

O funcionamento dos compressores é importante para eficiência energética do sistema, pois o uso não racional provoca desperdícios e diversas perdas por excesso ou *déficit* na geração de ar. Existem vários arranjos para o controle do sistema de AC, ou seja, partida/parada, carga/alívio, controle por modulação, sistema com velocidade variável, dentre outros. O objetivo de um sistema de controle é a utilização de forma mais eficiente o sistema de AC e aperfeiçoar a sua aplicação evitando a geração desnecessária ou *déficit* na linha de produção de ar (CEATI, 2007).

2.7.1 SISTEMAS DE PARTIDA E PARADA

No sistema de partida e parada após a geração de ar, o qual é armazenado em um reservatório, o compressor é desligado até que um nível mínimo de pressão seja atingido no reservatório. Quando é atingido o nível mínimo, o compressor é acionado para a elevação da pressão interna no reservatório (ROLLINS, 2004; ATLAS COPCO, 2015).

Este sistema é recomendado para compressores de baixo custo, geralmente menores do que 30 hp. Mas, tem como inconveniente o número de partidas que reduzem a vida útil do motor elétrico e de componentes do compressor (ROLLINS, 2004).

Os motores elétricos são limitados a um número fixo de ciclos de partida-parada por hora, geralmente entre quatro e cinco ciclos, pois, se os ciclos são frequentes há o sobreaquecimento do motor. No entanto, se houver necessidade de uma pequena diferença de pressão entre o ligar e o desligar com um controle de partida-parada automático, é necessário um reservatório maior para a redução do número de ciclos partida-parada (ROLLINS, 2004; ATLAS COPCO, 2015).

2.7.2 SISTEMA DE CARGA E ALÍVIO

O sistema de carga e alívio é de certa forma uma evolução do sistema de partida e parada, sendo que quando há pressão máxima no reservatório, a válvula de alívio é aberta eliminando o trabalho de compressão. Desta forma, o motor elétrico a vazio tem um consumo reduzido de energia (entre 15 a 35 %), tornando possível o trabalho de compressão da válvula de alívio. Opcionalmente, é possível instalar temporizadores para que após um tempo em alívio o compressor seja desligado, reduzindo o consumo de energia. As vantagens deste sistema é a redução do número de partidas do motor elétrico (ROLLINS, 2004).

2.7.3 SISTEMA DE CONTROLE DE FLUXO

Este tipo de sistema permite o controle do fluxo de saída de ar através de válvulas, podendo reduzir aproximadamente 15% do consumo de energia em alívio (ROLLINS, 2004).

2.7.4 CONTROLE ATRAVÉS DE VELOCIDADE VARIÁVEL

Com o inversor de frequência é controlada a velocidade do motor, ou seja, é possivel controlar o fluxo de vazão de ar comprimido através da velocidade do motor. Este método permite uma otimização da geração de AC, ou seja, a geração é proporcional à velocidade de rotação (SAIDUR *et al*., 2010).

Em sistemas com vários compressores, para uma boa eficiência de geração a um custo menor é viável a associação de compressores de carga/alívio com um compressor de velocidade variável. Sendo que, em uma associação ideal o compressor de velocidade variável é o compressor principal do sistema, e os demais compressores devem ser acionados ou desligados de acordo com a demanda de AC (ROLLINS, 2004).

2.8 EFICIÊNCIA OPERACIONAL

A perda de eficiência pode ser caracterizada por sete desperdícios. Um destes é denominado *overusage* ou a utilização de mais recursos do que o necessário para a produção de um determinado item. Neste contexto podemos considerar que equipamentos que consomem mais recursos do que o necessário, como energia elétrica, estão desperdiçando recursos energéticos (OHNO, 1988).

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 (SALVENDI, 2001). 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 18, 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" (SHEWHART, 1980; 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 (SHEWHART, 1980; DEMING, 1986).

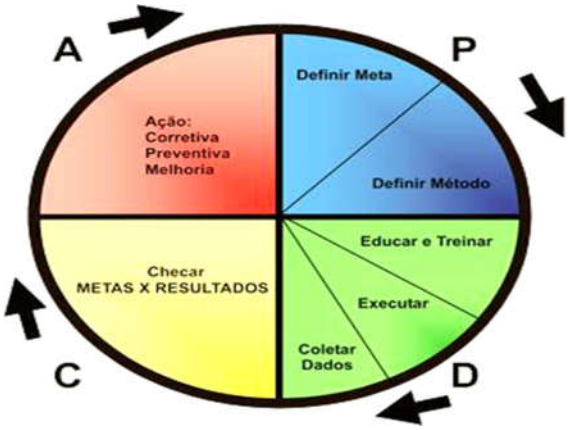


Figura 18. Ciclo PDCA.
Fonte: CASA DA CONSULTORIA, 2011.

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". Em PEIXOTO *et al.*, (2011) são avaliados os aspectos que provocaram a baixa confiabilidade em um sistema de geração de AC de uma indústria de Polietileno (PET). Foi constatando que os problemas na central de geração de AC eram provenientes de uma

refrigeração deficiente, ocasionada por um dimensionamento incorreto da rede de distribuição de água. Esta análise evitou um investimento desnecessário na substituição de máquinas e equipamentos.

2.9 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.

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. Diversos estudos apontam que os investimentos em reparos de sistemas são pagos em até vinte e quatro meses. Dentre os potenciais de redução de custos, temos o uso correto do AC, embora este não seja o mais indicado em algumas aplicações, como por exemplo, quando a energia elétrica é utilizada diretamente, a eficiência de um motor a AC é de 12,5%, enquanto a de um motor elétrico pode ser de até 90% (ZUERCHER, 2003).

Diversos autores dividem as auditorias em três categorias: Auditorias Preliminares, as realizadas em um prazo curto de tempo e tem como objetivo identificar grandes perdas em equipamentos; Auditorias Específicas, onde o foco pode ser um projeto, um equipamento ou parte das instalações e as Auditorias Abrangentes que abordam todas as questões de uma planta em funcionamento, desde consumo e distribuição às formas de utilização dos recursos (SAIDUR *et al*., 2010).

Para uma maior redução do consumo de energia elétrica em sistemas de AC, podem ser adotadas as seguintes medidas: avaliação dos aspectos técnicos, as dificuldades de implantação e retorno do investimento, que devem ser discutidos nas auditorias para viabilizar a implantação. Além disto, existem ferramentas que são indispensáveis em uma auditoria tais como: medidores de consumo de energia, tacômetros portáteis, medidores de temperatura, dados sobre o consumo e pressão do sistema de AC. Ferramentas computacionais como AirMAster+ e AirSim também podem auxiliar na análise potencial econômico de melhorias na geração e distribuição de AC (SAIDUR *et al*., 2010).

É importante ressaltar que, para maximizar os lucros dos investimentos, devem ser escolhidas empresas especializadas neste ramo para a análise energética do sistema. As oportunidades de economia podem chegar a 75%, e geralmente as com maior retorno estão na produção e distribuição de AC (ZUERCHER, 2003).

É recomendado que uma auditoria seja realizada a cada dois anos, e ainda para que a auditoria seja adequada é requerido um bom conhecimento técnico, planejamento estratégico e acompanhamento constante. Conhecimento técnico significa ter uma equipe bem treinada em sistemas e funcionamento de equipamentos de AC; o planejamento é uma estratégia que permite a verificação dos vazamentos e pendências que geram maiores custos, e finalmente, acompanhar os planos de ação e auditar regularmente a unidade analisada (GORELICK, 2008).

De forma análoga ao ciclo PDCA e conforme a Figura 19, as etapas de um programa de uso racional de energia passam por uma etapa de identificação e quantificação dos problemas (*Plan*), modificação (*Do*) e acompanhamento (*Check e Analysis*).

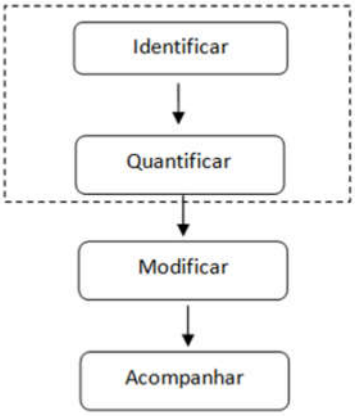


Figura 19. Etapas de um Programa de Uso Racional de Energia.

Fonte: ADAPTADO DE FUPAI/ELEKTRO, 2012.

É imprescindível que as seguintes questões sejam verificadas: Quanta energia está sendo consumida? Quem está consumindo energia? Como está sendo consuminda a energia e com qual eficiência? Esta etapa de identificação é imprescindível para um bom planejamento das ações (FUPAI/ELEKTRO, 2012).

Em (MARTINS *et al*, 2010) é relatada uma análise energética em sistemas de AC, para identificação das perdas de AC pelos vazamentos, admissão de ar aquecido ou por utilização de pressões acima do necessário. Também foram identificadas outras perdas significativas, com

destaque para os vazamentos em tubulações. Neste estudo foi realizada uma auditoria onde foram propostas melhorias para solucionar a perda de eficiência.

De acordo com o estudo laboratorial em (SANTOS *et al*, 2013), foram comparadas teoricamente a relação entre o aumento da temperatura de admissão e a perda de eficiência do sistema. Concluíndo-se que quanto maior a temperatura do de admissão, pior é a eficiência volumétrica do sistema.

Em um diagnostico energético o objetivo principal é verificar o consumo energético da unidade estudada e comparar com os resultados dos principais setores produtivos. Eventualmente, podem ser feitas medições em campo para apontar quantitativamente os maiores consumidores de energia e estratégias de ataque, sem considerar os aspectos econômicos (FUPAI/ELEKTRO, 2012).

Desenvolvida em projetos patrocinados pelo Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL), a metodologia empregada no estudo do melhoramento energético visa analisar o aspecto econômico e técnico considerando a utilização de energia elétrica e de combustíveis. É uma metodologia que exige conhecimento técnico para sua aplicação, demandando mais tempo e análise (FUPAI/ELEKTRO, 2012).

Em (GONÇALVES E CARDOSO, 2007) é analisada a viabilidade econômica da substituição de um parque de máquinas de geração de AC, defasadas tecnologicamente por modelos mais eficientes. Neste estudo, além do parque de geração que possuia uma das máquinas com controle de velocidade, foram modificados também o sistema de gerenciamento inteligente e as linhas de distribuição para sanar potenciais vazamentos e perdas de carga. No estudo é demonstrado que a substituição foi benéfica, com um retorno do investimento em 37 meses e também aumento da confiabilidade das máquinas.

No estudo (PLANT ENGENEERING, 2001) é analisada a viabilidade e a melhoria da eficiência energética na utilização de compressores com inversores de frequência. Um dos grandes problemas identificados foi o comportamento em baixas velocidades nas máquinas antigas agora acionadas pelos inversores.

É proposta nestes casos a substituição de motores padrão por motores de alto rendimento como uma boa prática para a redução do consumo de energia elétrica, em outros casos, é recomendado o uso de inversores de frequência. Em ambos os casos, a maior viabilidade ocorre em instalações com motores de potência mais elevada, justificando o investimento em um curto espaço de tempo (SAIDUR *et al*., 2010).

2.9.1 ABORDAGEM EM AUDITORIAS ENERGÉTICAS

De acordo com (FUPAI/ELEKTRO, 2012), 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. É sugerido seguir as etapas citadas no fluxograma da Figura 20, e adapta-las a cada situação.

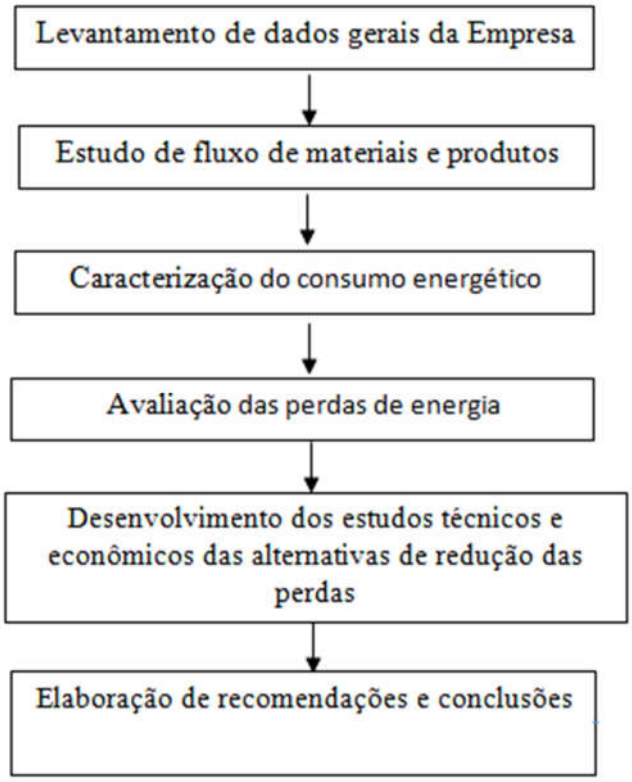


Figura 20. Etapas de um Programa de uso Racional de Energia em Empresas

Fonte: ADAPTADO DE FUPAI/ELEKTRO, 2012.

As etapas do levantamento de dados devem apresentar um relatório sintetizando todo o trabalho, incluindo as ações propostas e diagramas de Sankey, como o exemplificado na Figura 21. O diagrama de Sankey é uma exemplicação gráfica do processo de consumo de energia, sendo a entrada toda a energia do sistema e a saída a energia consumida pelo sistema e as perdas do processo. O relatório das instalações deve conter também recomendações de melhorias para minimizar as perdas energéticas (FUPAI/ELEKTRO, 2012).

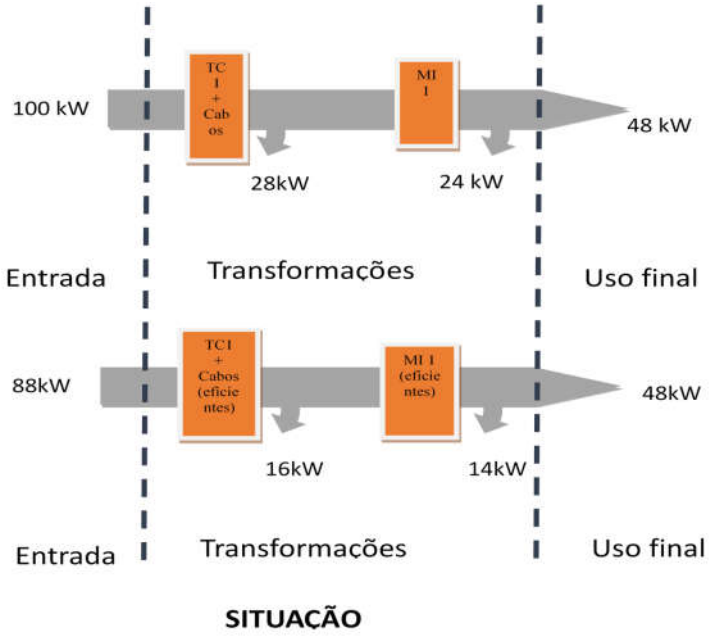


Figura 21. Exemplo de Diagrama de Sankey.

Fonte: Adaptado FUPAI/ELEKTRO, 2012.

Segundo (FUPAI/ELEKTRO, 2012) algumas informações são imprescindíveis para uma auditoria energética, conforme as apresentadas na Tabela 1, e também o levantamento dos dados em campo é relevante.

Tabela 1. Parâmetros avaliados em uma auditoria energética

Consumo de água, energia elétrica e de combustíveis ao longo de um ano;
Plantas, desenhos e esquemas detalhados e atuais das instalações;
Balanço energético e de materiais atualizados de cada unidade;
Temperaturas e pressões nos pontos relevantes, valores medidos e de projeto;
Características elétricas dos equipamentos e valores medidos associados;
Considerações sobre as especificações energéticas do produto;
Considerações ambientais e de localização da empresa;
Perspectivas de alterações no processo.

Ao final das análises e relatórios, devem ser indicadas as modificações sugeridas, conforme a prioridade. É importante destacar que, as modificações prioritárias devem ser as de

menor custo de implantação e maior impacto de redução. Na Tabela 2 é apresentada uma sugestão de prioridade.

Tabela 2. Priorização de recomendações (FUPAI/ELEKTRO, 2012)

Prioridade	Projeto	Operação	Manutenção
Alta	Devem ser justificadas adequadamente	De aplicação imediata, recursos disponíveis ou apenas treinamento	De aplicação imediata, recursos disponíveis ou apenas treinamento
Moderada	Geralmente, menos interessantes pelos recursos ou pelo benefício esperado.	Envolvem mudanças nos processos	Envolvem geralmente investimentos nos sistemas ou instrumentação

Capítulo 3

3 METODOLOGIA

A metodologia utilizada no trabalho foi baseada no ciclo PDCA para a implantação de novas tecnologias em compressores para aumentar eficiência energética em sistemas de AC.

Foram avaliadas duas auditorias energéticas realizadas nos anos de 2010 e 2012 em sistemas de AC, analisando soluções propostas e potenciais melhorias no sistema, avaliação da viabilidade econômica através da TIR (taxa interna de retorno do investimento) na auditoria que visava a substituição das máquinas e uma segunda avaliação contemplando a possibilidade de implantação de sistema de recuperação de calor.

Na última etapa é avaliada a implantação da norma ABNT ISO 50001 que visa a implantação da norma de gestão de energia.

3.1 ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA

A análise de viabilidade econômica foi realizada através de premissas definidas inicialmente, como a demanda de ar comprimido da unidade Planta SiC, a qualidade do processo, custos com a energia elétrica, aquisição de equipamentos e a manutenção do sistema. Esses fatores foram analisados com o objetivo de reduzir o consumo específico de energia elétrica em 25% e o custo de operação e manutenção da instalação.

3.1.1 UTILIZAÇÃO DO AR COMPRIMIDO NA INSTALAÇÃO

Na Planta SiC o AC é utilizado como energia pneumática em diversas etapas do processo, tanto nas ferramentas pneumáticas, em válvulas e atuadores pneumáticos, como em moinhos com AC (*Jet Mill*) e no tratamento de resíduos do processo auxiliando no funcionamento de filtros de despoeiramento.

A operação de filtros de despoeiramento e moinhos a AC são imprescindíveis para o funcionamento adequado da instalação por questões relacionadas à segurança no trabalho e produtividade, tornando o sistema de geração de AC uma ferramenta crítica e estratégica.

3.1.2 AUDITORIA INICIAL

Nos estudos preliminares foram analisadas as perdas de eficiência na geração de AC, através de um medidor de vazão (m^3/kWh) instalado na linha principal de distribuição de AC. Esta medição foi realizada durante um período pré-determinado para a obtenção de uma média significativa.

3.1.2.1 AUDITORIA REALIZADA EM 2010

Foi realizada uma avaliação do parque de compressores instalados no ano de 2010 e propostas soluções que serão descritas posteriormente no item 3.1.4.2. Na Figura 22 é apresentado o grupo de máquinas da casa principal, com 07 compressores modelos GA do fabricante Atlas Copco, sendo uma das máquinas reserva, 01 compressor Atlas Copco ZR275 e 01 compressor Atlas Copco ZR-5.

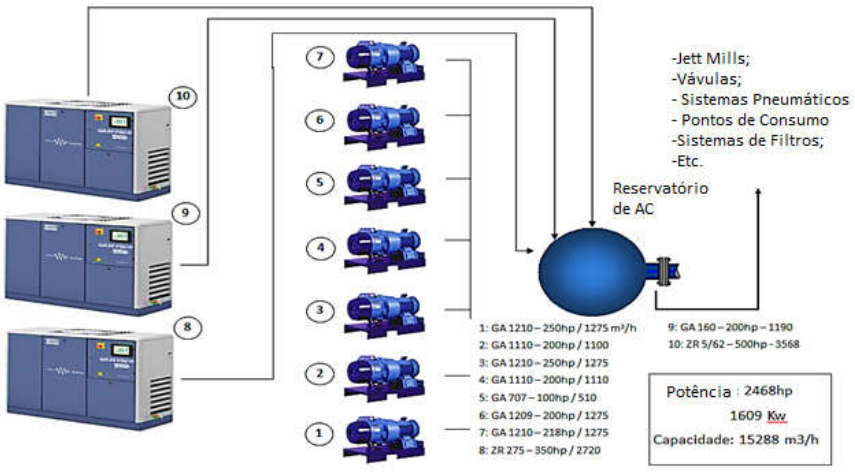


Figura 22. Casa de Compressores da Planta de SiC 2010.

Fonte: Adaptado Planta SiC, 2010.

3.1.2.2 CENTRAL PRINCIPAL EM 2010

Na central principal em 2010 estavam em operação 06 compressores modelo GA do fabricante Atlas Copco e 01 compressor reserva. Estas máquinas foram adquiridas sem um planejamento específico, durante a expansão da unidade. Na Tabela 3 são apresentadas as características dos seis compressores instalados na central principal da Planta SiC de 2009 à 2010.

Tabela 3. Características dos Compressores Instalados na Central Principal da Planta SiC de 2009 à 2010

	Compressores					
TAG:	CP 01	CP 02	CP 03	CP 04	CP 05	CP 06
Marca:	Atlas Copco	Atlas Copco	Atlas Copco	Atlas Copco	Atlas Copco	Atlas Copco
Modelo:	GA 1210	GA 1207	GA 1210	GA 160	GA 1100	GA 1100
Potência do Motor (hp)	250	200	250	200	200	200
Potência do Motor (kW)	186	150	186	180	150	150
Corrente Nominal (A):	340	275	340	327	275	275
Capacidade (m^3/min):	21	21	21	27,7	18,3	18,3
Fator de Potência do motor	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88
Fator de Serviço	1	1	1	1,2	1	1

Na Tabela 4 são apresentadas as principais características da central principal.

Tabela 4. Dados Característicos da Central Principal.

Regime de Operação 24h/dia-8.000h/ano		Regime de Operação 24h/dia-8.000h/ano	
Potencia total da central (hp)	1.300	Pressão de trabalho (Bar)	7
Potencia total da central (kW)	970	Altitude do local da central (m)	1060
Capacidade total da central (m^3/min)	127	Pressão atmosférica da central (Bar)	0,96
Capacidade total da central (pcm)	4.485	Umidade relativa média (mm)	60
Capacidade total da central (Nm^3/min)	118	Vazão máxima (Nm^3/min)	95,04
Potência específica nominal (kW/m^3)	0,127	Vazão média (Nm^3/min)	41,92
Fator específico aceitável	1,2	Déficit máximo (Nm^3/min)	298
Pressão mínima requerida pelo processo (Bar)	6,5	Déficit médio (Nm^3/min)	9,3
Pressão de trabalho da central (Bar)	7	Demanda máxima (Nm^3/min)	392,35
Temperatura da rede (ºC)	33	Demanda média (Nm^3/min)	51,22
Temperatura média do local (ºC)	33	Pressão máxima (Bar)	7,2
Tratamento do ar comprimido	Não	Pressão média (Bar)	6,52
Reservatórios	Sim	Potência total máxima (kW)	851,05
Capacidade total (m^3)	15	Potência total média (kW)	310,42

Para a auditoria foi realizada uma medição do regime de funcionamento, bem como a vazão consumida no dia 31/01/2010, conforme mostrado na Figura 23. Foram monitorados os dados de pressão (bar) e vazão (m^3/min) dos compressores 01, 02, 03, 04, 05 e 06 da central principal.

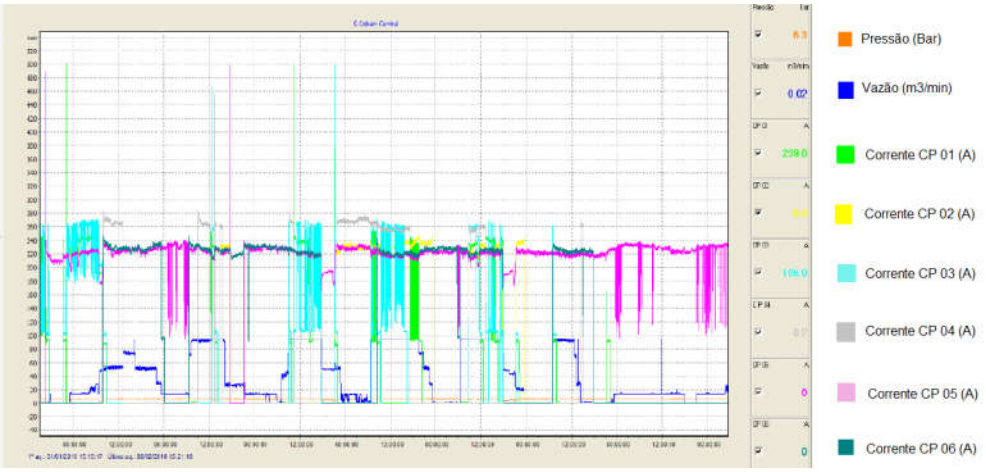


Figura 23: Regime de funcionamento da central principal de compressores no dia 31/01/2010.

Fonte.: Relatório de Auditoria Energética Planta SiC 2010.

Os valores médios de operação, foram a pressão média de operação (cor laranja) 6.3 Bar, vazão média (cor azul escuro) 0.02 m^3/min, a corrente média de operação do compressor 01 (cor verde) 239.6 A, a corrente média de operação do compressor 03 (cor azul claro) 105,9 A, a corrente média de operação do compressor 04 (cor cinza) 0.2 A. Analisando o gráfico da Figura 23 pode ser verificado que há uma grande oscilação no ritmo de operação dos compressores, os compressores 02 (cor amarela), 05 (cor rosa) e 06 (cor verde escuro) não estavam em operação em alguns momentos, comprometendo os resultados da auditoria energética.

Foi verificada a necessidade de um intervalo maior para a coleta de dados, devido a não coleta dos dados dos compressores 02, 05 e 06 que estavam desligados durante o monitoramento do dia 31/01/2010, sendo então definido o período de uma semana para minimizar os erros decorrentes da mudança do regime de produção durante a semana.

Os gráficos apresentados nas Figuras 24, 25, 26, 27, 28, 29 correspondem aos valores coletados de vazão (m^3/min), demanda (m^3/min), déficit (m^3/min) e pressão (Bar) na central principal dos compressores.

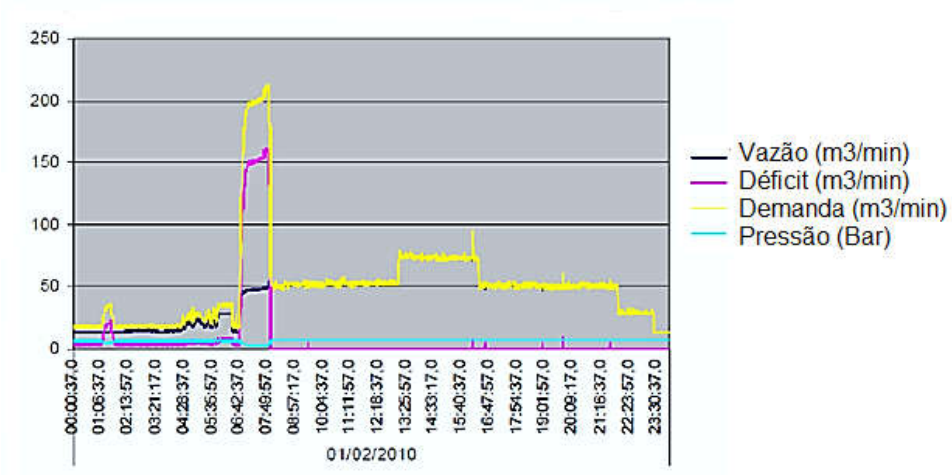


Figura 24: Regime de funcionamento da central principal no dia 01/02/2010.

Fonte.: Relatório de Auditoria Energética Planta SiC 2010.

No gráfico da figura 24, pode ser identificado um pico de demanda no horário de após às 6:42 do dia 01/02/2010, sendo o horário que entra em operação grandes consumidores de AC, como os moinhos a ar comprimido. Após as 23h30min a uma redução de demanda devido ao fim do turno de produção dos setores com moinhos à AC. Nas figuras 25, 26, 27, 28 e 29 entre o horário de 07h00min a 23h30min são identificados vários pontos de déficit de AC (cor rosa).

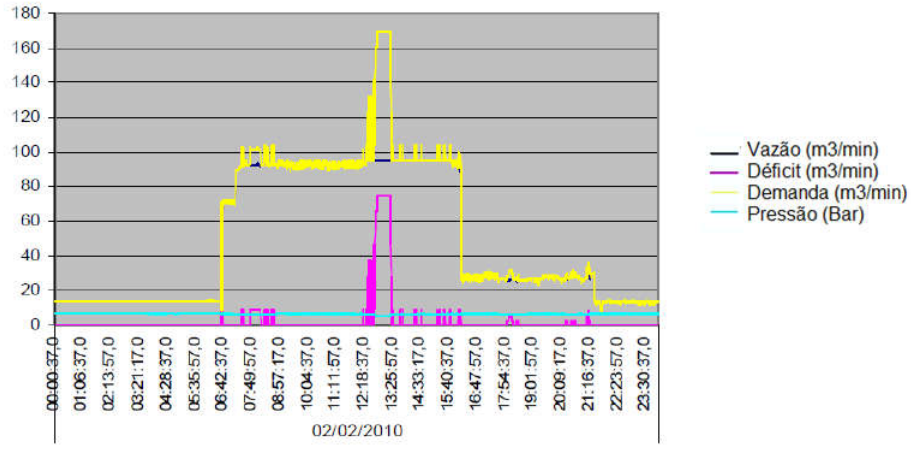


Figura 25: Regime de funcionamento da central principal no dia 02/02/2010.

Fonte.: Relatório de Auditoria Energética Planta SiC 2010.

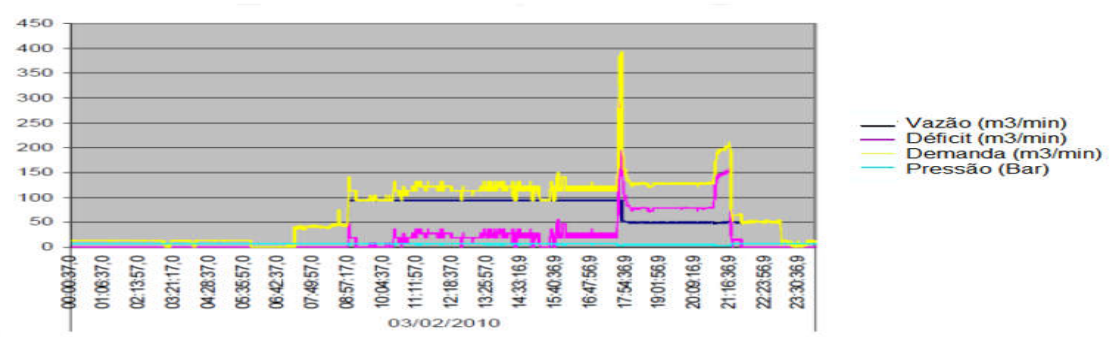


Figura 26: Regime de funcionamento da central principal no dia 03/02/2010.

Fonte.: Relatório de Auditoria Energética Planta SiC 2010.

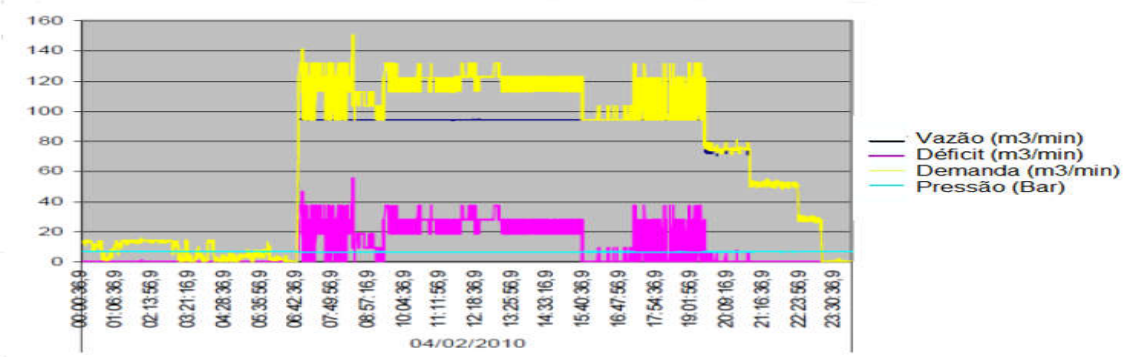


Figura 27: Regime de funcionamento da central principal no dia 04/02/2010.

Fonte.: Relatório de Auditoria Energética Planta SiC 2010.

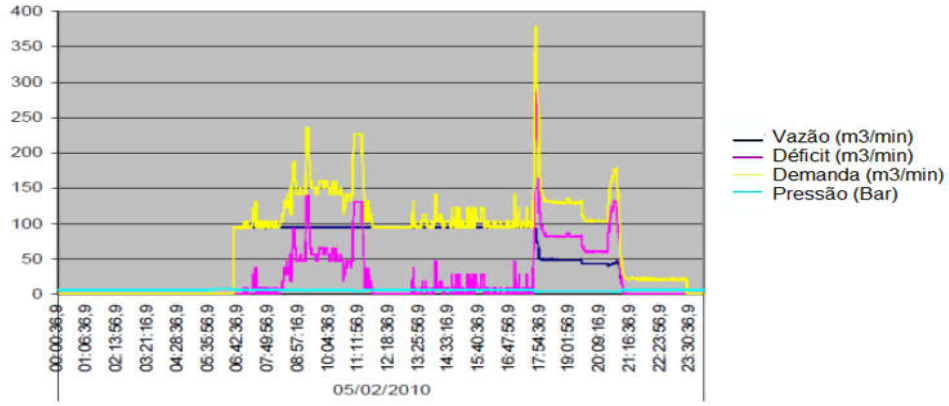


Figura 28: Regime de funcionamento da central principal no dia 05/02/2010.

Fonte.: Relatório de Auditoria Energética Planta SiC 2010.

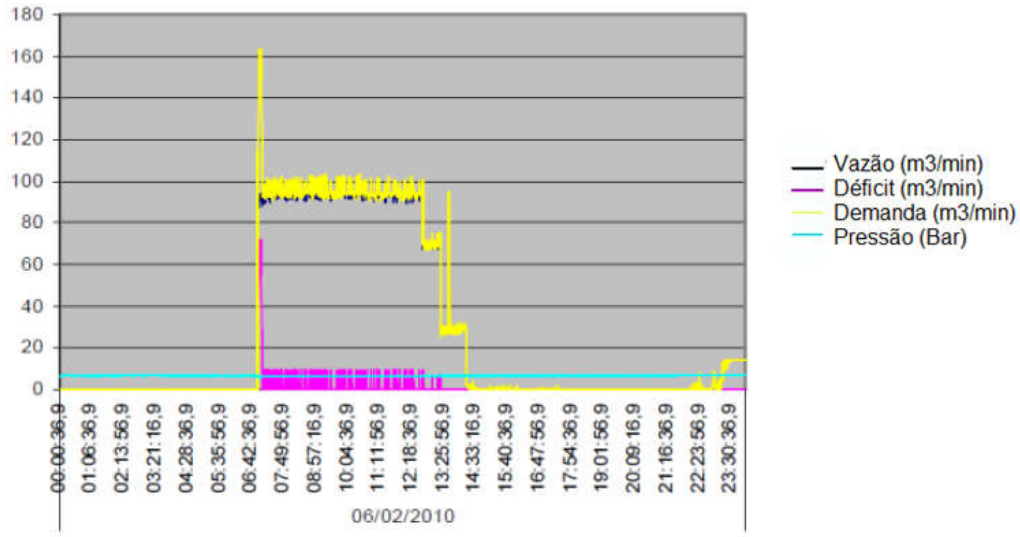


Figura 29: Regime de funcionamento da central principal no dia 06/02/2010.

Fonte.: Relatório de Auditoria Energética Planta SiC 2010.

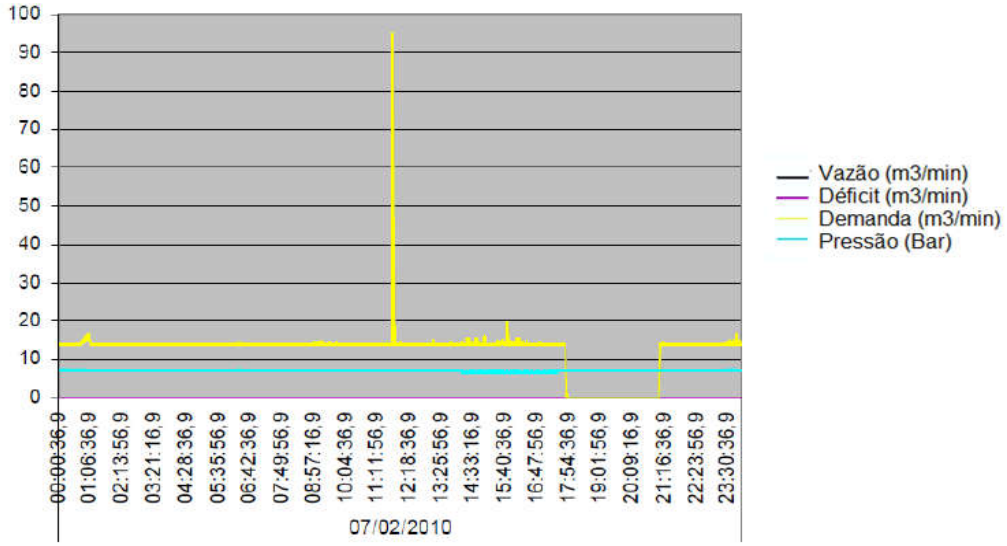


Figura 30: Regime de funcionamento da central principal no dia 07/02/2010.

Fonte.: Relatório de Auditoria Energética Planta SiC 2010.

Verificam-se nos dados coletados e conforme gráficos das figuras 24, 25, 26, 27, 28, 29 que apenas no dia 07/02/2010 (domingo) não houve pontos de *déficit* na geração de AC. O resultado do dia 07/02/2010 apresentado na Figura 30 pode ser explicado pelo não funcionamento do setor de beneficiamento de SiC da empresa, que é o principal consumidor de AC.

3.1.2.3 COMPRESSOR ZR 275

Na Tabela 5 são apresentados os dados do compressor ZR-275, que é um dos compressores dedicado a um setor específicoda unidade estudada o setor de Pós-Finos.

Tabela 5. Dados do compressor ZR-275

Compressor ZR 275	
TAG:	ZR 275
Marca:	Atlas Copco
Modelo:	ZR 275
Tipo:	Rotativo de parafuso lubrificado
Potência do Motor (hp)	350
Potência do Motor (kW)	260
Corrente Nominal (A):	450
Capacidade (m^3/min):	45
Fator de Potência do motor	0,88
Fator de Serviço	1

Na Tabela 6 são apresentados os dados de funcionamento do Compressor ZR-275.

Tabela 6. Dados de funcionamento do compressor ZR-275.

Regime de Operação 24h/dia-8.000h/ano		Regime de Operação 24h/dia-8.000h/ano	
Potência total (hp)	350	Altitude no local de instalação (m)	1060
Potência total (kW)	260	Pressão atmosférica (Bar)	0,96
Capacidade total (m^3/min)	45	Umidade relativa média (%)	60
Capacidade total (pcm)	1.589	Vazão máxima (Nm^3/min)	35,32
Capacidade total (Nm^3/min)	41	Vazão média (Nm^3/min)	20,61
Potência específica nominal (kW/m^3)	0,103	Déficit máximo (Nm^3/min)	160,4
Fator específico aceitável	1,2	Déficit médio (Nm^3/min)	0,68
Pressão mínima requerida pelo processo	6,5	Demanda máxima (Nm^3/min)	195,68
Pressão de trabalho da central (Bar)	7	Demanda média (Nm^3/min)	21,29
Temperatura da rede (°C)	33	Pressão máxima (Bar)	9,6
Temperatura média do local (°C)	33	Pressão média (Bar)	5,91
Tratamento do ar comprimido	Secador	Potência total máxima (kW)	277,89
Reservatórios	Não	Potência total média (kW)	174,09
Capacidade total (m^3)	2720		

Na Figura 31 são apresentados os valores médios coletados durante o monitoramento do compressor ZR-275, sendo a corrente média (cor verde) de 270 A, a vazão média (cor azul escuro) de 34.61 m^3/min e a pressão média (cor laranja) de 6.6 Bar.

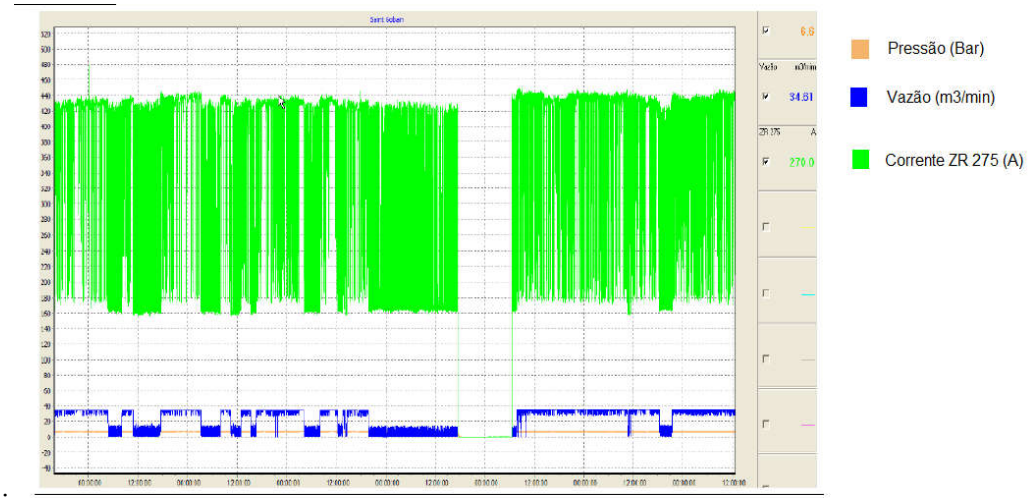


Figura 31: Monitoramento do Funcionamento do Compressor ZR-275.

Fonte.: Relatório de Auditoria Energética Planta SiC 2010.

No período de 23/12/2009 à 29/12/2009 foi realizado o monitoramento da vazão do compressor ZR-275 separado ao da central principal, pois este é conectado em uma linha independente para atendimento de um setor específico da fábrica denominado setor de Pós-Finos.

Na Figura 32 é mostrado o gráfico de operação do compressor ZR-275 no dia 24/12/2009. Neste caso, a medição foi necessária por se tratar de um compressor de atendimento exclusivo. Os valores coletados figura são vazão (m^3/min) em azul, demanda (m^3/min) em amarelo, déficit (m^3/min) em rosa e pressão (Bar) em azul claro.

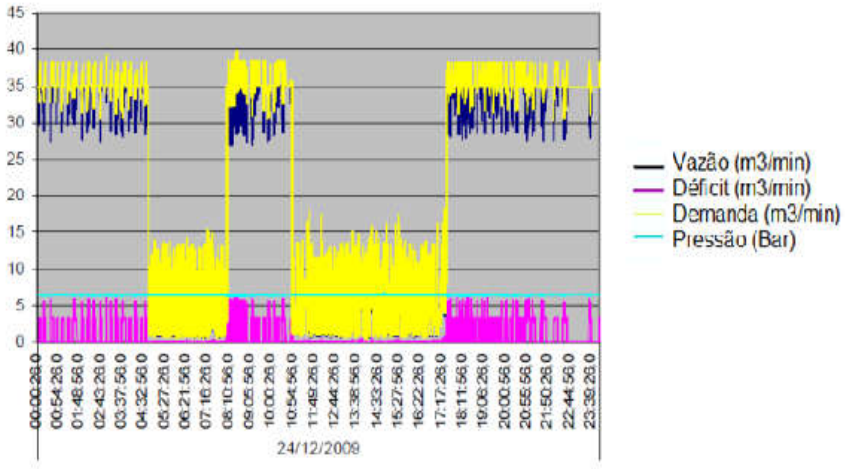


Figura 32. Monitoramento do Funcionamento do Compressor ZR-275 no dia 24/12/2009.

Fonte.: Relatório de Auditoria Energética Planta SiC 2010.

3.1.2.4 COMPRESSOR ZR-5

O compressor ZR-5 foi instalado para atender a planta de processamento de grãos micro-abrasivo da unidade, sendo também, independente da central principal.

No período de 23/12/2009 à 29/12/2009 foi realizado o monitoramento da vazão do ZR-5, separado ao da central principal. Assim como o modelo ZR-275, o ZR5 também é conectado em uma linha independente ao da central principal.

Na Tabela 7 são apresentados os dados característicos do compressor ZR-5.

Tabela 7. Dados do compressor ZR-5

Compressor ZR 275	
TAG:	ZR 5
Marca:	Atlas Copco
Modelo:	ZR 5
Tipo:	Rotativo de parafuso lubrificado
Potência do Motor (hp)	500
Potência do Motor (kW)	375
Corrente Nominal (A):	100
Capacidade (m^3/min):	59,4
Fator de Potência do motor	0,88
Fator de Serviço	1

Na Tabela 8 são apresentados os dados de operação do compressor ZR-5.

Tabela 8. Dados de funcionamento do compressor ZR-5.

Regime de Operação 24h/dia-8.000h/ano		Regime de Operação 24h/dia-8.000h/ano	
Potência total (hp)	500	Altitude do local de instalação (m)	1060
Potência total (kW)	373	Pressão atmosférica (Bar)	0,96
Capacidade total (m^3/min)	59	Umidade relativa média (%)	60
Capacidade total (pcm)	2.083	Vazão máxima (Nm^3/min)	50,07
Capacidade total (Nm^3/min)	55	Vazão média (Nm^3/min)	15,23
Potência específica nominal (kW/m^3)	0,112	Déficit máximo (Nm^3/min)	177,8
Fator específico aceitável	1,2	Déficit médio (Nm^3/min)	8,83
Pressão mínima requerida pelo processo (Bar)	6,5	Demanda máxima (Nm^3/min)	227,84
Pressão de trabalho (Bar)	7	Demanda média (Nm^3/min)	24,06
Temperatura da rede (°C)	33	Pressão máxima (Bar)	7,1
Temperatura média do local (°C)	33	Pressão média (Bar)	6,29
Tratamento do ar comprimido	Não	Potência total máxima (kW)	325,32
Reservatórios	Não	Potência total média (kW)	173,62
Capacidade total (m^3)	3568		

No dia 07/01/2010, foi realizado o monitoramento do regime de operação do compressor ZR-5, conforme apresentado na Figura 33, onde é indicada a pressão média (cor laranja) de

operação de 6.6 Bar, a vazão média (cor azul) de 49.97 m^3/min e corrente média (cor verde) de operação de 90.8 A.

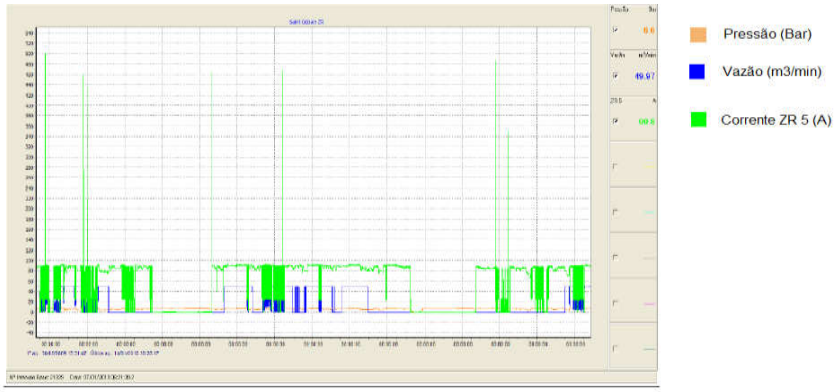


Figura 33. Gráfico de Monitoramento de Operação Compressor ZR-5.

Fonte.: Relatório de Auditoria Energética Planta SiC 2010.

Na Figura 34 são apresentados os resultados do monitoramento da operação do compressor ZR-5 no dia 31/12/2009, neste caso por se tratar de um compressor dedicado a produção de grãos micro abrasivos na planta SiC, uma medição foi considerada suficiente na auditoria. Os valores coletados são vazão (m^3/min) em azul escuro, demanda (m^3/min) em amarelo, déficit (m^3/min) em rosa e pressão (Bar) em azul claro. Vários pontos de déficit, na cor rosa, são identificados durante o período de operação.

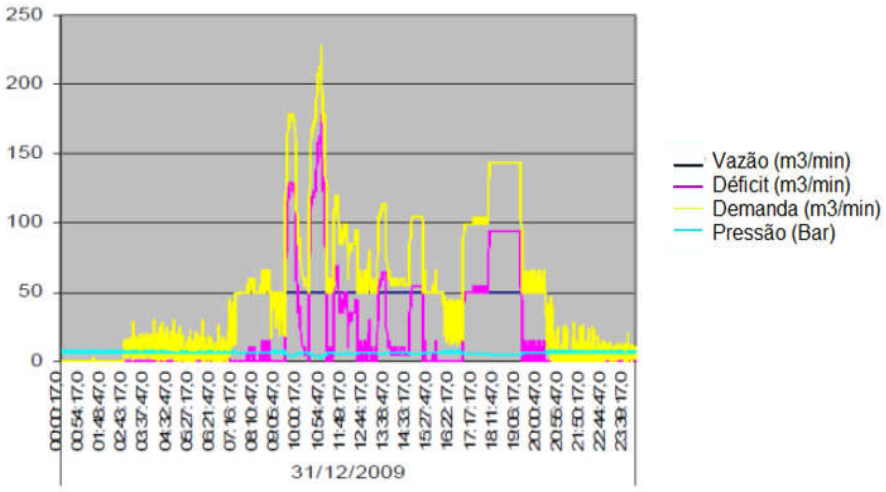


Figura 34. Gráfico de Funcionamento Compressor ZR-5 no dia 31/12/2009.

Fonte.: Relatório de Auditoria Energética Planta SiC 2010.

3.1.3 DADOS CONSOLIDADOS

Com os dados coletados foram identificadas e apresentadas as principais características da central de AC conforme Tabela 9, o quadro de vazões na Tabela 10, e o consumo energético na Tabela 11. A potência específica nominal de 0,1207 kWh/m^3 , conforme a Tabela 09, foi identificada como o parâmetro de referência de funcionamento da central de AC, sendo esta a potência necessária para a produção de 1 m^3, de acordo com os equipamentos instalados na planta SiC.

Tabela 9. Dados de Consumo Específico da Planta SiC 2010.

Sistema de Compressores Planta SiC - 2010			
Central	Potência Instalada (kW)	Capacidade Instalada (m^3/h)	Consumo Específico (kWh/m3)
Principal	975	7640	0,1276
ZR 5	373	3568	0,1045
ZR 275	261	2720	0,0959
Total	1609	13328	0,1207

Tabela 10. Dados de Vazão da Planta SiC 2010

Quadro de Vazões Planta SiC – 2010		
Central	Vazão Média (Nm^3/h)	Vazão Máxima (Nm^3/h)
Principal	6076	6614
ZR 5	2040	3389
ZR 275	1488	2553
Total	9604	12556

Tabela 11. Dados de Consumo Energético Planta SiC 2010

Consumo Energético Planta SiC 2010		
Central	(kWh)	(kWh/ano)
Principal + ZR 5	1.145,17	7.729.877,25
ZR 5	209,26	1.412.511,75
Total	1.354,43	9.142.389,00

Após a comparação entre o consumo específico de energia dos compressores instalados, foi constatado que a central principal de AC possuía uma baixa eficiência na geração de AC, com uma potência específica de 0,1276 kWh/m^3, bem acima dos valores identificados para o compressor ZR-5 de 0,1045 kWh/m^3 e do ZR-275 de 0,0959 kWh/m^3. Comparando a potência específica do ZR-5 com a central principal, esta consome 22% a mais de energia elétrica para

produzir 1 m^3 de AC. Quando comparada a central principal com o ZR-275, a central principal consome 33% a mais de energia elétrica para a produção de 1 m^3 de AC. Por este motivo, foi proposto um estudo para a substituição das máquinas da central principal por máquinas de maior eficiência energética.

3.1.3.1 PREMISSAS INICIAIS PARA O NOVO ESTUDO DO SISTEMA DE AR COMPRIMIDO

Foram definidas as premissas iniciais para a escolha das novas máquinas e equipamentos mais eficientes. Um dos objetivos proposto é 25% de economia de energia por metro cúbico (m^3) de ar gerado na planta SiC, além da implantação de um sistema eficiente de tratamento de ar. Um dos grandes problemas na utilização de ar sem tratamento são os transtornos causados no processo produtivo, em especial em moinhos a AC que têm sua operação comprometida devido à umidade do ar.

3.1.3.2 ESTUDOS TÉCNICOS INICIAIS

No ano de 2010 foram realizados diversos estudos em conjunto com uma equipe especializada em eficiência energética de uma concessionária de energia elétrica, sediada no estado de Minas Gerais.

Após o levantamento dos dados iniciais de potência, horas trabalhadas e fator de utilização, apresentados na Tabela 12, e objetivando uma economia de energia elétrica de 25%, foi calculado o potencial valor financeiro de redução de custos correspondente a R$ 192474,53/ano, no ano de 2010.

Tabela 12. Avaliação Inicial de Compressores (2010).

Cálculo de Economia com os Compressores									
Máquinas	Horas Trabalhadas								
	Segunda/Sexta	Segunda/Sábado	Sábado/Domingo	Anual	cv	kW	Fator de utilização	R$/kW	R$
CP 01	85	92		4602	250	186,5	0,9	0,13	100417,94
CP 06	Desligado			0	200	149,2	0	0,13	0
CP 05	76	83	26	5486	200	149,2	0,9	0,13	95765,81
CP 02	76	83	26	5486	200	149,2	0,9	0,13	95765,81
CP 03	76	83		4134	218	162,63	0,9	0,13	78659,59
CP 04	76	83		4134	200	149,2	0,9	0,13	72164,76
ZR-5	85	92		4602	500	373	0,9	0,13	200835,88
ZR-275	76	83		4134	350	261,1	0,9	0,13	126288,33
			Total	32578				Total	769898,11
Economia estimada de 25% ao ano = R$ 192.474,53									

3.1.3.3 ESTUDOS DE VIABILIDADE ECONÔMICA

Depois de levantadas as premissas iniciais do estudo do investimento em compressores, e realizada em 2010 a análise técnica da situação operacional dos compressores, foram feitas as cotações para a substituição dos compressores instalados na central principal em 2010 por compressores com maior eficiência energética.

As cotações iniciais apresentadas na Tabela 13 são de dois grandes grupos fabricantes, Atlas Copco e a Ingersoll Rand, ambos com conhecimento e visibilidade mundial no ramo de compressores.

A primeira avaliação contemplava a aquisição de compressores e periféricos, tais como o sistema de tratamento de ar e sistema inteligente de gerenciamento dos compressores. Os compressores especificados são convencionais e isentos de óleo e tipo parafuso, e esta escolha se deu pelo conhecimento técnico da tecnologia utilizada e pela indicação dos próprios fabricantes avaliados.

Tabela 13. Primeira Avaliação de Viabilidade Econômica

1ª Análise (valores em R$)				
	INGERSOLL LUBRICADO	ATLAS LUBRIFICADO	INGERSOLL ISENTO	ATLAS ISENTO
Compressores	1.208.700,00	1.952.000,00	2.325.800,00	2.191.000,00
Periféricos Ingersoll	651.700,00	0	638.300,00	0
Periféricos Atlas Copco	0	47.900,00	0	47.900,00
Total	1.860.400,00	1.999.900,00	2.964.100,00	2.238.900,00

Na segunda avaliação foram incluídos periféricos da empresa HB Soluções em ar comprimido LTDA, como padrão do sistema de tratamento de ar para ambos os fabricantes, sendo os dados apresentados na Tabela 14.

Com os dados das Tabelas 13 e 14 foram considerados os custos complementares relacionados ao projeto. Estes custos foram estimados conforme os orçamentos levantados por empresas de infraestrutura (mecânica, hidráulica, estrutural, elétrica e civil), tendo como objetivo um melhor preço final para a instalação do novo sistema. Na Tabela 14, os valores relacionados a outros custos se referem a despesas relacionadas a transporte e encargos financeiros adicionais fornecidos pela empresa.

Os dados financeiros são apresentados na Tabela 15.

Tabela 14. Segunda Avaliação de Viabilidade Econômica.

2ª Análise (valores em R$)				
	INGERSOLL LUBRIFICADO	ATLAS LUBRIFICADO	INGERSOLL ISENTO	ATLAS ISENTO
Compressores	1.208.700,00	1.952.000,00	2.325.800,00	2.191.000,00
Periféricos Ingersoll	105.400,00	0	105.400,00	0
Periféricos Atlas Copco	0	47.900,00	0	47.900,00
Periféricos HB	447.500,00	0	506.900,00	0
Outros Custos	0	4.790,00		4.790,00
Total	1.761.600,00	2.004.690,00	2.938.100,00	2.243.690,00

Tabela 15. Terceira análise: Inclusão dos Investimentos Adicionais.

3ª Análise (valores em R$)				
	INGERSOLL LUBRIFICADO	ATLAS LUBRIFICADO	INGERSOLL ISENTO	ATLAS ISENTO
Compressores e Periféricos	1.761.600,00	2.004.690,00	2.938.100,00	2.243.690,00
Projeto Mecânico	38.200,00	38.200,00	38.200,00	38.200,00
Projeto Civil	12.100,00	12.100,00	12.100,00	12.100,00
Projeto Estrutural	10.400,00	10.400,00	10.400,00	10.400,00
Projeto Hidráulico	2.800,00	2.800,00	2.800,00	2.800,00
Projeto Elétrico	54.000,00	54.000,00	54.000,00	54.000,00
Investimento Mecânico	150.000,00	150.000,00	150.000,00	150.000,00
Investimento Civil	80.000,00	80.000,00	80.000,00	80.000,00
Investimento Elétrico	250.000,00	250.000,00	250.000,00	250.000,00
Total	2.359.100,00	2.602.190,00	3.535.600,00	2.841.190,00

Após a análise dos orçamentos dos fabricantes, foram solicitados também os dados adicionais dos compressores de sistema lubrificado e isento de óleo. Nas Tabelas 16, 17 e 18 são apresentadas as características técnicas dos equipamentos especificados dos dois fabricantes (compressores lubrificados, compressores isentos de óleo e periféricos).

Tabela 16. Dados Característicos dos Compressores Rotativos de Parafuso e Variável Lubrificados das Marcas Ingersoll e Atlas Copco.

SISTEMA LUBRIFICADO		
Compressores Rotativos de Parafuso	Ingesoll	Atlas Copco
Modelo	S SR XFE 300 2S	GA 315 AFF 100 220/60 YD
Potência do Motor (kW)	224	261,1
Vazão (m^3/h)	2863	2790
Quantidade (Unidade)	4	4
Compressores Rotativos Variáveis	Ingesoll	Atlas Copco
Modelo	IRN 300 H-2S	GA 315 AFF VSD 440/60
Potência do Motor (kW)	223	290
Vazão (m^3/h)	2863	3060
Quantidade	1	1
Valor Total (m^3/h)	14315	14220

Tabela 17. Dados Característicos dos Compressores Parafuso e Variável Isentos de Òleo

SISTEMA ISENTO DE ÓLEO		
Compressores Rotativos de Parafuso	Ingesoll	Atlas Copco
Modelo	SIERRAL-350	ZR 400-8,6P 440/660 220
Potência do Motor (kW)	261	261,1
Vazão (m^3/h)	2718	3480
Quantidade (Unidade)	4	3
Compressores Rotativos Variáveis	Ingesoll	Atlas Copco
Modelo	IRN 200 2S	ZR 315 VSD-8,6
Potência do Motor (kW)	149,2	298
Vazão (m^3/h)	1496	3060
Quantidade	2	1
Valor Total (m^3/h)	13864	13500

Tabela 18. Dados Característicos dos Periféricos Ingersoll, HB e Altas Copco

PERIFÉRICOS		
Secadores	Ingersoll	HB
Modelo	TD 2.110	DPRM1000A3736XX
Potência (kw)	18.4	NE
Quantidade (unidade)	6	6
Filtros Coalescentes Pré	Ingersoll	Atlas Copco
Modelo	GP 2.100	A1-1000F
Quantidade (unidade)	6	6
Filtros Coalescentes Pró	Ingersoll	Atlas Copco
Modelo	HE 2.100	A2-1000F
Quantidade (unidade)	6	6
Reservatório de Ar	Ingersoll	Atlas Copco
Capacidade (m^3)	10	10
Pressão de Projeto (kgf/cm^2)	8,05	8,05
Quantidade (unidade)	1	1

Com os dados das Tabelas 16, 17 e 18 foram avaliados os custos adicionais de instalação e manutenção, e foi inicialmente definido que o sistema seria composto de compressores parafuso tipo lubrificado, sendo que uma das máquinas deveria ser dotada de um sistema de controle de velocidade. Por este motivo foi solicitado às empresas, novas propostas contendo todos os custos envolvidos, incluindo os custos de manutenção preventiva.

Na Tabela 19 são apresentados os custos das novas propostas, e foi verificado que a empresa Atlas Copco não enviou os dados referentes à manutenção preventiva.

Nas Tabelas 20 e 21 foram comparadas as soluções apresentadas pelos fabricantes Atlas Copco e Ingersoll Rand, considerando o consumo de energia, regime de utilização de 24 horas/dia e preço de energia projetado para 2012 a 2016 a partir do estimado em 2010.

O consumo específico inicial para comparação foi de 0,1207 kWh/m^3 e no escopo de projeto é proposto um consumo específico mínimo de 0,0987 kWh/m^3. Estes valores foram propostos nas premissas do projeto e discutidos com os fabricantes.

Tabela 19. Comparação Ingerssoll Rand x Atlas Copco.

	Ingersol Rand Total R$	Atlas Copco Total R$
Custo Total Equipamentos	1.493.694	1.501.900
Custo Total da Manutenção (PARCIAL)	940.076	Não Disponível
Obras Civis, elétrica e adequações	554.026	287.650
Custo da Energia (TOTAL)	11.197.448	11.535.004
Custo da Energia (SEM o ZR275)	9.217.921	10.090.151
Total (Equipamento+Serviço+Energia)	13.739.929	12.560.504
Total Sem Obra Civil	12.691.142	13.036.904

Tabela 20. Custos com consumo de energia equipamentos Ingersoll Rand.

Ano	2012	2013	2014	2015	2016	
Demanda Máxima (kW)	1410	1410	1410	1410	1410	Total
Energia (MW/ano)	12.356	12.356	12.356	12.356	12.356	61.779
Custo Energia (R$/ano)	1.943.568	2.131.129	2.248.386	2.371.944	2.502.421	11.197.448
Demanda Mínima (kW)	1161,13	1161,13	1161,13	1161,13	1161,13	Total
Energia (MW/mês)	10.171	10.171	10.171	10.171	10.171	50.857
Custo energia (R$/mês)	1.599.977	1.754.380	1.850.908	1.952.652	2.060.034	9.217.921

Tabela 21. Custos com consumo de energia equipamentos Atlas Copco.

Ano	2012	2013	2014	2015	2016	
Demanda Máxima (kW)	1453	1453	1453	1453	1453	Total
Energia (MW/ano)	12.728	12.728	12.728	12.728	12.728	63.641
Custo Energia (R$/ano)	2.002.158	2.195.374	2.316.165	2.443.448	2.577.859	11.535.004
Demanda Mínima (kW)	1271	1271	1271	1271	1271	Total
Energia (MW/mês)	11.134	11.134	11.134	11.134	11.134	55.670
Custo energia (R$/mês)	1.751.372	1.920.385	2.026.047	2.137.386	2.254.961	10.090.151

Na avaliação final a empresa Atlas Copco revisou as propostas iniciais, conforme a Tabela 22. Porém, mesmo após a revisão, o consumo específico de energia e os valores de custos com aquisição de equipamentos, foram superiores aos da empresa Ingersoll Rand. Nesta avaliação foi utilizado um sistema de pontuação de atendimento do escopo apresentado para a comparação das propostas dos fabricantes. Uma alternativa ao sistema de avaliação utilizado seria a análise do ciclo de vida da instalação, que seria global envolvendo todos os custos. Na revisão das propostas a empresa Ingersoll Rand se destacou, pois, seu consumo específico foi 17,6% menor do que do outro fabricante.

Uma segunda análise foi feita englobando os custos para a instalação do sistema, sendo a proposta da empresa Atlas Copco a mais viável. Nesta proposta foi solicitada a inclusão de um sistema de partida de motores com a "Chave *SoftStarter*", para evitar oscilações e problemas no sistema de alimentação da fábrica. Os custos das obras civis e instalações foram menores em comparação com o da empresa Ingersoll, conforme a Tabela 23.

Tabela 22. Avaliação econômica final.

Análise Técnica dos Equipamentos				
Fabricante	Ingersoll Rand	Pontos	Atlas Copco	Pontos
Velocidade Constante				
Quantidade de Compressores	4	1	7	0
Estágios de Trabalho	2	1	1	0
Consumo Específico (kWh/m^3)	0,0933	2	0,1146	0
Capacidade Efetiva (m^2/min)	167,2	1	158	0
Pressão a plena carga (Bar)	8,6	1	9,1	1
Pressão Mínima e Máxima (Bar)	4.5 a 7.1	1		1
Temperatura de Ambiente (ºC)	Até 46	1		0
Ruído (dB)	85	0	71	1
Peso (kg)	5.933	0	3.341	1
Velocidade Variável				
Quantidade de Compressores	1	1	1	1
Faixa de Vazão (m^3)	18.3 a 43.6	1	0 a 26.7	1
Faixa de Pressão (Bar)	4.57 a 10.8	1		1
Temperatura de Ambiente (ºC)	46	1		0
Consumo Específico (kW/m^2)	0,0985	2	0,1155	0
Ruído (dB)	80	0	69	1
Tipo de Lubrificante	Biodegradável	1		1
Peso (kg)	5.933	0	3.930	1
Custos dos Equipamentos				
Compressores	R$ 1.048.379,00		R$ 1.025.500,00	
Tratamento de Ar	R$ 360.450,00		R$ 358.400,00	
Gerenciamento	R$ 65.054,00		R$ 118.000,00	
Total	R$ 1.473.883,00	2	R$ 1.501.900,00	0
Pontos		17		10

Uma segunda análise foi feita englobando os custos para a instalação do sistema, sendo a proposta da empresa Atlas Copco a mais viável. Nesta proposta foi solicitada a inclusão de um sistema de partida de motores com a "Chave *SoftStarter*", para evitar oscilações e problemas no sistema de alimentação da fábrica. Os custos das obras civis e instalações foram menores em comparação com o da empresa Ingersoll, conforme a Tabela 23.

Tabela 23. Comparação final, com custos de instalação e consultoria.

Análise Técnica – Obras				
Fabricante	Ingersoll Rand	Pontos	Atlas Copco	Pontos
	Projetos			
Civil	R$ 4.464,29	-	R$ 0,00	-
Mecânico	R$ 43.869,05	-	R$ 0,00	-
Elétrico	R$ 39.464,29	-	R$ 0,00	-
Comunicação	-	-	-	-
Sub Total	R$ 87.797,63	-	R$ 0,00	-
	Montagens			
Material	R$ 150.074,70	-	R$ 133.000,00	-
Serviços de Montagem Geral	R$ 294.129,55	-	R$ 154.650,00	-
Medições e Relatórios	R$ 22.023,81	-		-
Sub Total	R$ 466.228,06	-	R$ 287.650,00	-
Total	R$ 554.025,69	-	R$ 287.650,00	2
Pontos		0		2
Sub Total do Projeto	R$ 2.027.908,75		R$ 1.789.550,00	
Valor de Consultoria	R$ 150.139,75		R$ 150.139,75	
Diagnóstico Inicial	R$ 32.821,00		R$ 32.821,00	
Chave SoftStarter	R$ 48.000,00		R$ 94.500,00	
Quadro Elétrico	R$ 170.000,00			
Total do Projeto	R$ 2.428.869,44		R$ 2.067.010,75	

Apesar da relevância dos custos da instalação, os custos de energia elétrica têm maior impacto financeiro, sendo o consumo específico de energia por m^3 o parâmetro mais relevante

para a energia elétrica. Os valores apresentados pelo fabricante Ingersoll Rand de consumo específico de energia foi de 0,09424 kWh/m^3, sendo inferior ao apresentado pela empresa Atlas Copco que foi de 0,1147 KWh/m^3. Portanto, o fabricante Ingersoll Rand foi escolhido para a implantação do sistema de AC, conforme mostrado na Tabela 24.

Tabela 24. Comparação final considerando o consumo específico de energia.

BASE DE CÁLCULO	
Tempo de Análise Anual (horas)	6.000
Custo Energia (R$)/kWh	0,13
Vazão Média (m^3/h)	11.082
Pressão de Trabalho (Bar)	8

CÁLCULO DE ECONOMIAS (SEM TRATAMENTO DE AR)				
Pacote	Atual	Sugerido pela Consultoria	Ingersoll	Atlas Copco
Potência Específica Nominal (kW/m^3)	0,1207	0,0858	0,09424	0,1147
Consumo Anual (MW/h)	8.025,58	5705,014	6266,21	7626,63
Custo de Energia Anual (R$)	1.043.325	741.652	814.607	991.462
Economia anual (R$)	0	301.674	228.719	51.863
Economia Percentual (%/ano)	0	28,91	21,92	4,97
Custo Total dos Equipamentos (R$)	0	1.779.829	2.428.869	2.067.011

3.2 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após a seleção técnica e econômica é necessário captar recursos para viabilizar o investimento. Na Tabela 25 são apresentados os dados para o cálculo da Taxa Interna de Retorno (TIR) (ARDALAN, 2000). Para realização dos cálculos foi utilizado a taxa de juros SELIC de 8% a.a. correspondente ao dia 12/07/2012. Nesta análise a TIR foi de 19,1 % com retorno do investimento previsto para um período de 6,4 anos, considerando a vida útil da instalação de 15 anos e uma taxa de juros anual de 8%, o fator de capitalização de acordo com os juros compostos no período definido. Um dado importante a ser considerado são os gastos com a manutenção e

operação, os quais foram reduzidos com a nova instalação (MINISTÉRIO DA FAZENDA, 2015).

Tabela 25 .Análise Econômica do Investimento para Aquisição de Compressores

Análise de Investimentos em Compressores em 2012		
Vida útil	15	Anos
Taxa de Juros	8%	
Fator de Capitalização	0.117	
Investimento (custo de capital total)	2428869	R$
Custo anualizado do investimento	283763.7	R$/ano
Custo O&M	145300	R$/ano
Custo Energia	814607	R$/ano
Custo total anualizado	1243670.7	R$/ano
Sistema convencional		
Custo anual com eletricidade	1043325	R$/ano
Custo O&M	407500	R$/ano
Outros	10000	R$/ano
Custo total anualizado	1460825.0	R$/ano
Economia anual	217154.3	R$/ano
Tempo de retorno	6.4	Anos
Valor presente líquido	1721044.4	R$
Taxa interna de retorno	19.1%	a.a

Como os custos de instalação, operação e manutenção estão relacionadas as economias diretas, um dos fatores que influencia de forma mais impactante é a taxa de juros do investimento captado. Na Figura 35 é demonstrada a variação do fluxo de caixa de acordo com a taxa de juros, no caso para 6%, 8%, 10%, 12% e 14%. Para uma taxa de juros de 14% a.a. o tempo de retorno de investimento é de aproximadamente 9 anos, demonstrando que uma correta forma de captação de investimento é crucial para viabilização do projeto.



Figura 35. Fluxo de Caixa x Taxas de Juros para investimento de compressores Planta SiC.

3.2.1 NOVA CENTRAL DE COMPRESSORES (2012)

Foi realizada a substituição dos compressores e modificações no *layout* da instalação com o objetivo principal de reduzir o consumo específico de AC em 25%, além da instalação de sistema de tratamento de AC que foi prevista inicialmente.

As características dos 05 novos compressores tipo parafuso lubrificado da marca Ingerssoll Rand são mostradas na Tabela 26. Um deles denominado Nirvana é dotado de um sistema de controle de velocidade através de um inversor de frequência, conforme a Tabela 30. Os compressores Atlas Copco ZR-275 e Atlas Copco ZR-5, que já estavam instalados, foram mantidos como máquinas reservas.

Tabela 26. Dados dos Compressores Nirvana, 1, 2, 3 e 4 Planta SiC 2012

Compressores	Nirvana	1	2	3	4
Marca:	Ingersoll-Rand				
Modelo:	NIRVANA 300 2S	SSR EP 300 2S	SSR EP 300 2S	SSR EP 300 2S	SSR EP 300 2S
TAG:	CP Nirvana	CP 01	CP 02	CP 03	CP 03
Potência (hp)	345	345	345	345	345
Potência (kW)	257,37	257,37	257,37	257,37	257,37
Capacidade (m^3/min)	41,8	41,8	41,8	41,8	41,8
Tensão (V)	375	375	372	374	376
Eficiência Motor (%)	93	93	93	93	93
Fator de Potência	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89
Fator de Serviço	1,15	1,15	1,15	1,15	1,15

Além da instalação dos compressores, foram instalados 03 secadores de ar por refrigeração modelo Ingersoll TD 3810, cujas características são apresentadas na Tabela 27.

Tabela 27. Dados dos Secadores 1, 2, 3 Planta SiC 2012.

Secadores	1	2	3
Marca :	Ingersoll-Rand	Ingersoll-Rand	Ingersoll-Rand
Modelo .:	TD 3810	TD 3810	TD 3810
Tipo :	Secagem por Refrigeração		
Consumo : (kWh)	16,1	16,1	16,1
Tensão (V)	220	220	220

Na análise dos investimentos por tipo como o apresentado na Figura 36, pode ser verificado que os investimentos em equipamentos e tubulações incluídos no conjunto *Mecânico*, representam 70% dos custos totais do projeto. Desta forma, verifica-se que, uma escolha correta

de acordo com as análises de viabilidade é extremamente representativa, podendo inviabilizar o projeto quando inadequadamente dimensionado.

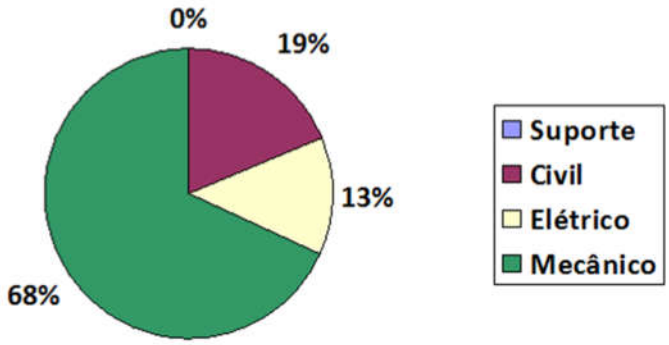


Figura 36. Composição percentual dos investimentos.

Na Figura 37 é mostrado o esquema de funcionamento dos compressores da unidade. A central principal é composta por compressores e secadores de ar da empresa Ingersoll. As demais máquinas são reservas, que podem ser acionadas em caso de manutenção ou mesmo com um possível aumento da demanda de AC.

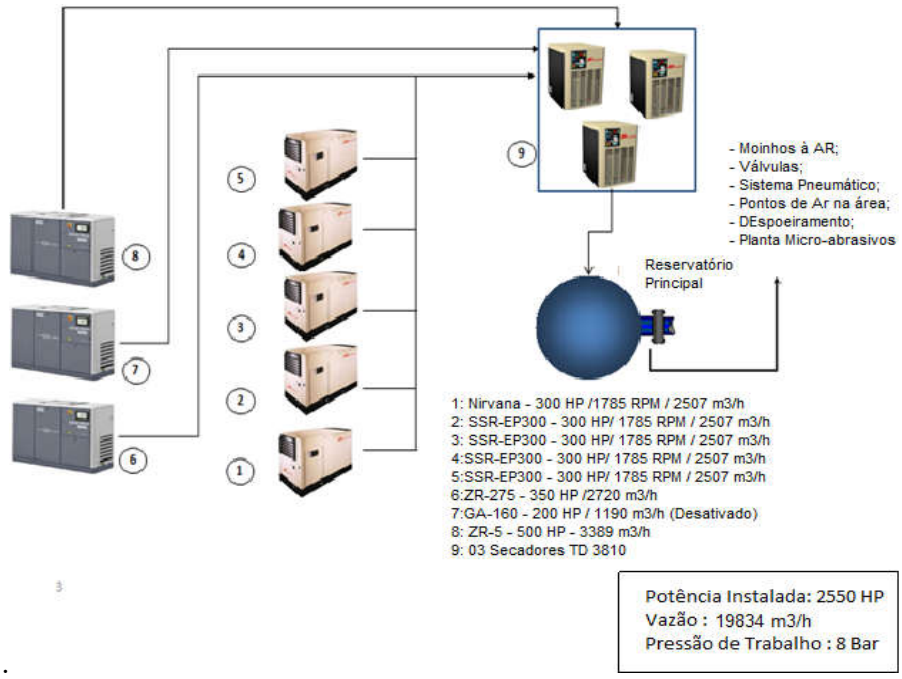


Figura 37. Fluxograma da Nova Central de Compressores Planta SiC 2012.

Na Figura 38 é mostrada a instalação da central de compressores que foi concluída em 2012.



Figura 38. Casa da nova central de compressores instalada em 2012.

3.2.2 SEGUNDA AUDITORIA ENERGÉTICA

Após a instalação dos novos compressores, foi feita uma nova auditoria do sistema, para os devidos ajustes necessários e verificação do desempenho dos equipamentos em operação. Na Figura 39 é apresentado o gráfico de resultados da segunda auditoria, onde: Potência total (cor laranja), compressor Nirvana (cor azul escuro), compressor 01 (cor rosa claro), compressor 02 (cor verde escuro), compressor 03 (cor rosa escuro) e o compressor 04 (cor verde claro).

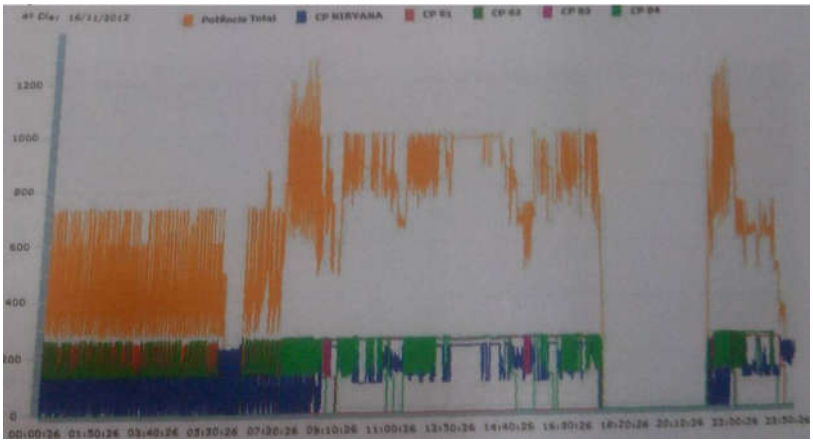


Figura 39: Gráfico medição vazão X potência da nova casa de compressores.

Fonte.: Relatório de Auditoria Energética Planta SiC 2012.

No relatório fornecido pela consultoria contratada para auditoria energética de 2012, é verificado que o consumo específico de energia médio da casa de compressores foi de 0,0938 kWh/m^3, atingindo o objetivo principal do projeto de redução 25%.

Com relação ao desempenho energético do sistema, foram relatadas pendências no sistema de gerenciamento inteligente dos compressores e no sistema de controle de pressão da central. O sistema de gerenciamento de compressores foi parte das ações de eficiência energética definida na auditoria de 2010, porém foi relatado como uma das pendências no *startup* da nova central. O painel do sistema de gerenciamento inteligente pode ser visto na Figura 40 e o sistema de modulação de pressão na Figura 41. Ambos têm como objetivo monitorar e mudular o funcionamento dos compressores de forma a garantir uma pressão apropriada no vaso de pressão e o funcionamento das máquinas em cascata, ligando e desligando os compressores conforme a demanda de AC. O compressor Nirvana dotado de inversor de frequência complementa a demanda de AC para reduzir ao mínimo o consumo de energia.



Figura 40. Sistema de gerenciamento inteligente de compressores.



Figura 41. Sistema de modulação de pressão.

Um dos principais problemas do sistema de gerenciamento não inteligente é o excesso de horas em alívio dos compressores não dotados de inversor de frequência. Um compressor em alívio tem um consumo de aproximadamente 20% da energia total gasta em operação, porém sem gerar AC.

Na Tabela 28 são resumidos os valores das horas de operação e as horas em carga da nova central de compressores. Apróximadamente 20% do tempo de operação dos compressores 01, 02, 03 e 04 foram em alívio, portanto, não houve geração de AC.

Devido à deficiência do sistema de gerenciamento inteligente os compressores serão interligados a um sistema supervisório central, onde através de instrumentação e lógicas de programação será realizado o gerenciamento dos compressores da unidade. Vale ressaltar que, o representante do fabricante não conseguiu solucionar o problema do sistema de gerenciamento inteligente dos compressores.

Tabela 28. Horas em Operação X Horas em Carga Central de Compressores 2012

Compressor	Horas de Operação (h)	Horas em Carga (h)	Horas em Alívio (Carga – Operação) (h)
Compressor 01	10086	8443	1643
Compressor 02	11535	10044	1491
Compressor 03	11164	9343	1821
Compressor 04	11345	9483	1862
Total	44130	37313	8638

3.2.3 MANUTENÇÃO

Os gastos com manutenção representam uma proporção significativa do custo total de um sistema de AC. De acordo com (CAPELLI, 2007), 12% dos custos de instalações de AC se referem à manutenção, sendo necessária a sua consideração nos custos gerais de uma central de AC.

A manutenção de sistema de AC tem um papel importante na economia energética. Filtros, tubulações e purgadores quando sujos podem causar uma perda de carga além do normal, aumentando o consumo de energia elétrica. Pontos importantes devem ser verificados tais como: reguladores de pressão, resfriamento de água, e limpeza das máquinas para o funcionamento adequado dos sistemas de AC (SAIDUR *et al*., 2010).

Na Figura 42 é demonstrada a evolução dos gastos com a manutenção da Planta SiC. Foi desconsiderado o ano de 2009 por causa da crise econômica mundial, e o ano de 2012 pois houve a mudança de *layout* na casa de compressores.

Na Figura 42 pode ser verificado também que, a substituição da antiga central pelas novas máquinas influenciou positivamente a evolução dos gastos. Mesmo com peças e sobressalentes de valor mais elevado, é praticamente inexistente o índice de corretivas no novo sistema, o que melhorou a confiabilidade da planta.

Houve transtornos e gastos não programados com os secadores de ar, pois, estes não foram incluídos no plano de manutenções preventivas.

Foi identificado erro no dimensionamento dos purgadores tipo boia, os quais foram substituídos por purgadores temporizados. O erro no dimensionamento dos purgadores causou a perda de filtros coelescentes instalados no sistema, aumentando os gastos com manutenção.

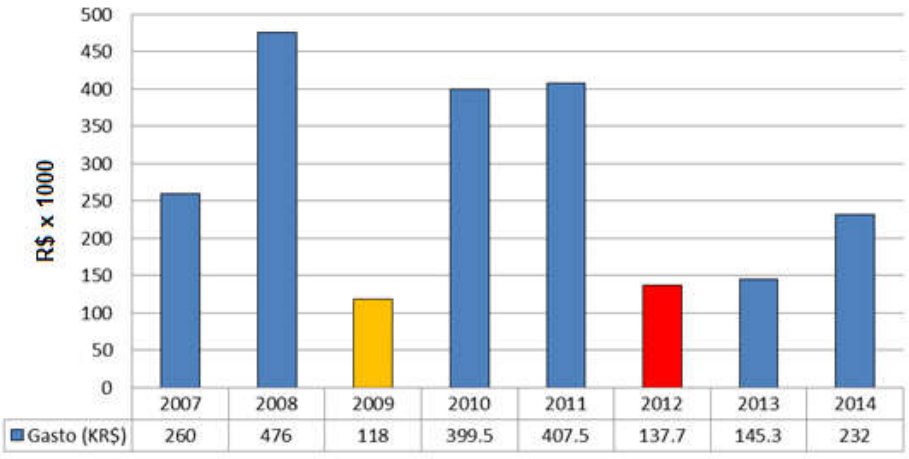


Figura 42. Gastos com Manutenção dos Compressores da Planta SiC

Na verificação dos filtros coalescentes, identificou-se que a disposição dos secadores de ar estava em um nível de cota mais elevado, como mostrado na Figura 43, contribuindo para o acúmulo de condensado nos filtros.



Figura 43. Disposição dos Secadores em Relação aos Compressores.

A diferença de cota associada à instalação dos secadores antes do vaso de pressão provoca o acúmulo de condensado na parte inferior da instalação, onde estão localizados os filtros coelescentes dos compressores Ingersoll.

Este tipo de instalação como mostrado na Figura 44, com o vaso de pressão instalado posterior aos secadores e como mostrado na Figura 45, tem a desvantagem de sobrecarregar os secadores de ar, pois uma parte considerável do condensado se depositará no fundo do principal vaso de pressão. Se o vaso de pressão fosse instalado antes dos secadores, seria drenado pelos purgadores, reduzindo assim, a demanda dos secadores.



Figura 44. Disposição dos Secadores em Relação ao Vaso de Pressão e aos Filtros Coalescentes.



Figura 45. Vaso de Pressão da Instalação.

Como medida mitigatória foram instalados purgadores tipo boia nos filtros coalescentes para drenar todo o condensado gerado, conforme mostrado na Figura 46. Porém, o funcionamento do modelo escolhido foi ineficiente, com problemas constantes de entupimento que causavam acúmulo de água nos filtros coalescentes, e a consequente perda dos elementos filtrantes do conjunto. Com isso, há o aumento dos custos de manutenção e a redução da eficiência do tratamento do ar da instalação.



Figura 46: Filtro Coalescente com Purgador tipo Boia.

Na Figura 47 é apresentado o orifício por onde deveria ocorrer a decantação dos purgadores tipo boia.



Figura 47: Orifício de Purga de Purgador Tipo Boia.

O purgador instalado na central de AC da planta SiC em 2012, apresentava constantemente a obstrução do orifício, e que devido a disposição do sistema de secagem acima dos purgadores, provocava o acúmulo de condensado nos filtros coelescente como mostrado na Figura 48 e a sua consequente perda.



Figura 48: Drenagem Manual de Condensado da Linha de Ar Comprimido.

Após análise para a eliminação do condensado da linha e com o resultado apresentado na Tabela 29, foi identificada como alternativa viável e rápida implementação a instalação de purgadores temporizados, como os da Figura 49, no lugar dos purgadores tipo boia instalados inicialmente.

Tabela 29. Comparação entre as Alternativas para Eliminação de Condensado.

Altenativa	Facilidade de	Custo de implantação	Eficiência
Alterar o Layout da instalação	Baixa	Alto	Alta
Instalação de Purgadores	Alta	Baixo	Média
Redimensionar Purgadores tipo	Médio	Baixo	Alta



Figura 49: Filtro Coalescente com Purgador Temporizado.

Como alternativa de maior eficiência foi verificada a necessidade do redimensionamento dos purgadores tipo boia. Porém, pelas dificuldades encontradas, tais como o travamento dos mesmos, e o custo elevado do conjunto de filtros coalescente (cinco conjuntos instalados), cerca de R$ 3.000,00/cada conjunto, foi escolhida a instalação de purgadores temporizados.

3.2.4 MELHORIAS

Um dos pontos identificados como discutível à eficiência energética da nova casa de compressores foi a capatação de ar aquecido pela própria central de compressores. Após análise e devido aos desarmes do sistema de proteção de alguns equipamentos, foi identificado que o ar de exaustão do sistema de arrefecimento dos compressores estava aquecendo a sala de compressores (Figura 50), pois o ar aquecido ficava concentrado no galpão dos compressores.



Figura 50: Sala de Compressores Planta SiC 2012.

Para a captação de ar diretamente do ambiente externo, sem a influência do aquecimento de ar da central de AC, foram realizadas aberturas na parte externa da instalação.

A abertura como mostrada na Figura 51, foi feita na área posterior da central de AC. Como a temperatura de admissão influencia diretamente na eficiência do sistema, a abertura foi a medida adotada para o aumento da eficiência energética do sistema, além de eliminar os desarmes devido ao acionamento do dispositivo térmico de proteção.



Figura 51: Aberturas Realizadas na Central de Compressores 2012.

O processo produtivo também foi influenciado por contratempos relacionados à disponibilidade dos prestadores de serviços da manutenção preventiva dos secadores, resultando em parada corretiva no sistema de tratamento de ar da central.

A parada corretiva ocorreu devido a não inclusão dos secadores no plano de manutenção preventivo da central, pois a empresa de manutenção preventiva dos compressores da central não trabalhava com secadores de ar como os da Figura 52.

Nas manutenções preventivas para substituição de filtros coalescentes foram identificados problemas na isolação dos componentes do sistema de válvulas, as quais apresentaram problemas de não abertura e deformação no eixo da haste. Algumas destas válvulas estavam instaladas no sistema *baypass* dos filtros coelescentes. As mesmas foram substituídas por válvulas do tipo gaveta, como as da Figura 53.

Também foram identificados erros na linha principal, como o envio de ar sem tratamento pelos secadores na operação do compressor ZR-5 para um dos setores da unidade.



Figura 52: Secadores de Ar Planta SiC 2012.



Figura 53: Válvulas Gaveta Instalada em Substituição de Válvulas de Esfera.

Capítulo 4

4. RECUPERAÇÃO DE ENERGIA

Uma das alternativas para o aumento da eficiência energética da central de compressores seria o aproveitamento do calor gerado durante a compressão do ar. Mais de 80% da energia utilizada para compressão do ar é convertida em calor, sendo o sistema resfriado por trocadores de calor (SAIDUR *et al*., 2010). .

Em vários casos é possível reaproveitar este calor para atividades que necessitam de aquecimento, por exemplo, para o aquecimento de água para vestiários, para aquecimento de escritórios ou utilização em processos industriais como a secagem de produtos (ESTU, 1998).

Analisando o contexto da unidade estudada, e levando em consideração as baixas temperaturas na região, uma das alternativas seria a utilização do ar quente, Figura 54, proveniente da exaustão dos trocadores de calor para o aquecimento de ambientes de escritório.



Figura 54: Exaustão de Ar da Central de Compressores.

A configuração mais usual seria o direcionamento do ar espelido pela exaustão através de dutos e ventiladores até o escritório ou sala que deverá ser aquecida, conforme mostrado na Figura 55. Na unidade o escritório central é localizado a cerca de 110 metros da central de compressores, portanto, deverá ser analisada a perda de calor durante o trajeto para constatar a viabilidade.

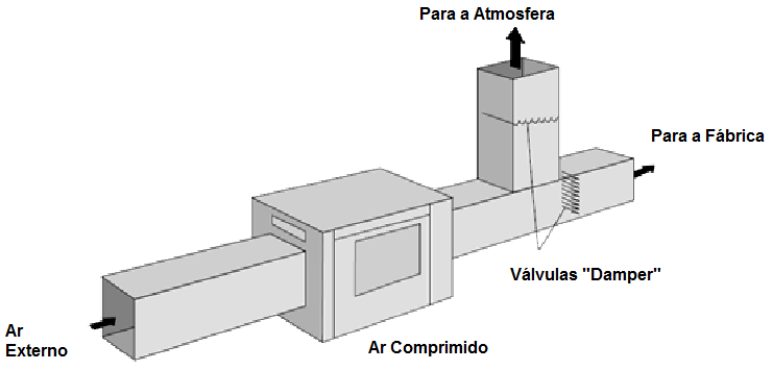


Figura 55: A configuração típica para recuperação de Ar aquecido em centrais de compressores.

Fonte: ESTU, 1998.

Uma segunda alternativa seria a utilização do calor residual para a secagem de produtos produzidos na unidade. Esta solução resultará na economia de gás liquefeito de petróleo (GLP), o qual é utlizado nos processos de secagem de produtos e no aquecimento de água de chuveiro.

Como terceira alternativa, pode ser proposta a modificação do sistema de aquecimento de água do vestiário central, semelhante ao esquema apresentado na Figura 56.

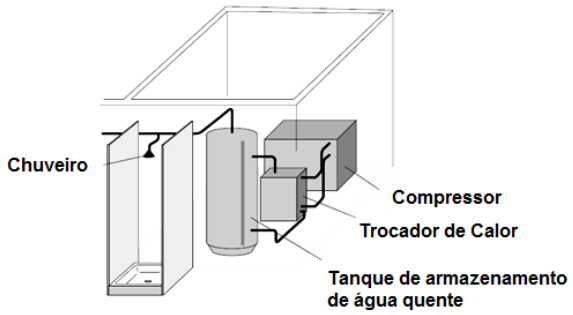


Figura 56: Configuração de Reaproveitamento de Calor para Utilização em Chuveiros

Fonte: ESTU, 1998.

Atualmente, o GLP é utilizado para o aquecimento de um boiler, conforme mostrado na Figura 57. Em busca de alternativas para o aproveitamento do calor gerado, verificou-se que para os compressores reservas Atlas Copco existiam alternativas disponíveis pelo próprio fabricante. No caso das máquinas do fabricante Ingersoll foi analisado que a melhor solução seria a instalação de um trocador de calor óleo/água no sistema, porém, esta solução não é disponível no mercado brasileiro.



Figura 57: 1: Boiler de Aquecimento de Água do Vestiário Central; 2: Informações Técnicas do Boiler do Vestiário Central.

Na Figura 58 é apresentado o sistema de um fabricante americano.



Figura 58: Exemplo de Trocador de Calor Óleo/Água

Fonte: Folder da Ingerssol Rand (2008).

Existem diversos fabricantes de trocadores de calor. Uma alternativa, diante da inexistência de trocador de calor no mercado brasileiro da fabricante Ingersoll, seria adquirir e adaptar um equipamento de outro fabricante. Este sistema tem um custo de aproximadamente R$200.000,00, não sendo inclusos os valores das tubulações e da obra civil. Na Figura 59 é demonstrado o esquema de instalação deste tipo de dispositivo, ressaltando que o mesmo não compromete a eficiência do sistema quando adequadamente dimensionado.

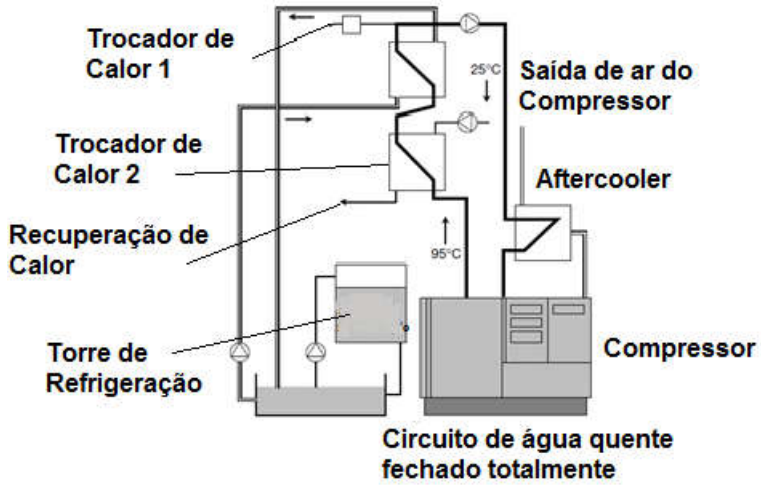


Figura 59: Diagrama de um Trocador de Calor Óleo/Água

Fonte: ESTU, 1998.

Como justificativa econômica para este investimento, tem-se os gastos com GLP conforme a Tabela 30. Os valores de consumo relacionados ao sistema atual de vestiário (chuveiro) e secador de produtos correspondem a mais de R$ 180.000,00.

Tabela 30. Consumo de GLP no ano de 2015.

Consumo de GLP SiC Planta 2015 para Valor de R$3,33/Kg de GLP.			Total Gasto (R$)
Empilhadeira	19634 Horas	32316,12kg	R$ 107.612,7
Chuveiro	19906 Horas	19905,87kg	R$ 66.286,5
Secador	34354 Horas	34353,86kg	R$ 114.398,3

Considerando um custo adicional de R$ 600.000,00 no investimento inicial para recuperação de calor, de forma a adquirir equipamentos, realizar instalações e obra civis. Os custos evitados com consumo de GLP relacionados a chuveiros e secador de produtos, viabilizariam o investimento com uma TIR de 21.3 % e um tempo de retorno de investimento de 5,7 anos conforme demonstrado na Tabela 31.

Conforme mostrado o gráfico da figura 60, mesmo para uma taxa de juros em torno de 14% a.a. o tempo de retorno do investimento seria de 7 anos.

Tabela 31: Análise de Viabilidade com Sistema de Recuperação de Calor.

Análise de Investimento Compressores 2012 + Recuperação de Calor		
Vida útil	15	Anos
Taxa de Juros	8%	
Fator de capitalização	0.117	
Investimento (custo de capital total)	3028869	R$
Custo anualizado do investimento	353861.4	R$/ano
Custo Operação e Manutenção	145300	R$/ano
Custo Energia	814607	R$/ano
Custo com GLP	107612	R$/ano
Custo total anualizado	1421380.4	R$/ano
Sistema convencional		
Custo anual com eletricidade	1043325	R$/ano
Custo O&M	407500	R$/ano
Outros	10000	R$/ano
Custo com GLP	288297	R$/ano
Custo total anualizado	1749122.0	R$/ano
Economia anual	327741.6	R$/ano
Tempo de retorno	5.7	Anos
Valor presente líquido	2597497.5	
Taxa interna de retorno	21.3%	

Quando previsto no projeto inicial este tipo de instalação de recuperação de calor tem custos reduzidos na instalação e pode influenciar na localização geográfica da instalação, dando preferência às proximidade de potenciais consumidores de calor. Com a possibilidade de reaproveitamento do calor de exaustão para secagem de produtos seria interessante que os locais de instalação dos compressores fossem próximos do sistema de secagem, pois haveria um uso racional do calor e economia com sistema de isolamento térmico de tubulações. No caso de instalações existentes, deve ser considerado um custo maior com o sistema de isolamento.

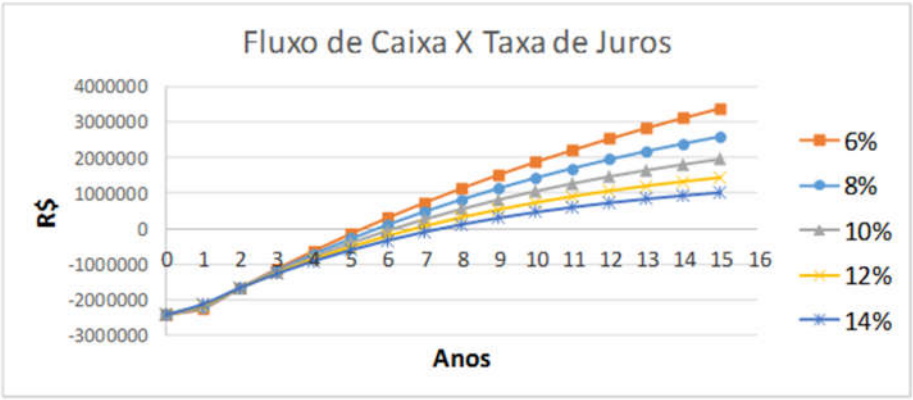


Figura 60: Fluxo de Caixa x taxa de Juros, para sistema com recuperação de energia.

4.1 APLICAÇÃO DA NORMA ABNT NBR ISO 50001

A ABNT NBR ISO 50001(ABNT, 2011) refere-se a sistemas de gestão de energia com requisitos para:

- Estabelecer uma política de energia com objetivos concretos para melhorar a eficiência energética;
- Definir um padrão de uso da energia, identificando as áreas críticas e compreendendo os fatores relevantes no uso da energia;
- Manter uma estimativa periódica do uso da energia, permitindo a visibilidade para planejar os investimentos e melhorias;
- Levar em consideração o consumo de energia no processo de decisão de projetos e aquisição de equipamentos, matérias-primas ou serviços.

No caso da Planta SiC a aplicação da (ABNT, 2011) é conveniente por ser uma grande consumidora de energia elétrica. A (ABNT, 2011) utiliza os conceitos do ciclo PDCA aplicados ao conceito de gestão energética, conforme apresentado na Figura 61. Tem com objetivo estabelecer sistemas e processos necessários para melhorar o desempenho energético

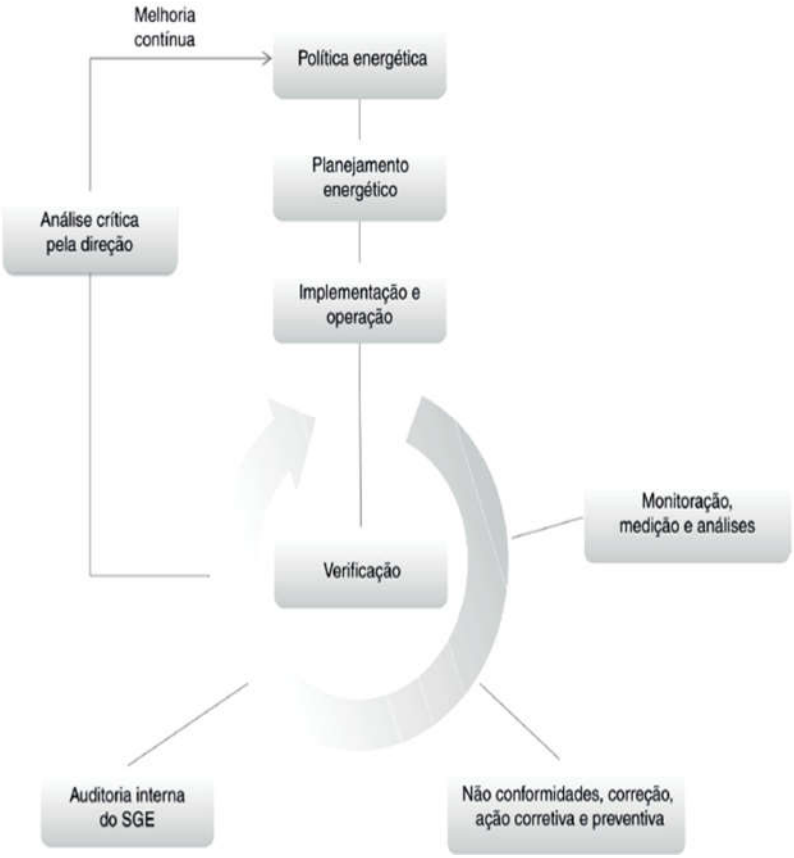


Figura 61. Modelo de Sistema de Gestão de Energia ABNT NBR ISO 50001

No item 4 da (ABNT, 2011), são apresentados os requisistos do sistema de gestão de energia. Na Tabela 32 são comparados alguns destes requisitos com os da Planta SiC, conforme os pontos identificados durante a coleta de dados para esta auditoria energética.

Segundo a (ABNT, 2011), a planta SiC possui a maioria dos requisitos necessários, e já possui experiência em normas reguladoras por já ser certificada em normas ambientais, de saúde e segurança. Outro ponto favorável é que já possui diversos indicadores de controle energéticos voltados ao processo produtivo. Como pertence a um grande grupo multinacional, este grupo possui uma política energética desde 2014. Porém, se faz necessário a interpretação desta política e determinação de fronteiras a serem contempladas pelo sistema de gestão de energia. Como principal ponto pendente identificado tem-se a realização periódica de auditórias energéticas na instalação. Após, a definição destas auditórias será possível criar metas possíveis para melhoria do desemplenho energético incluindo as instalações de AC.

Tabela 32. Atendimento aos ítens da norma ABNT ISO 50001, planta SiC 2016

REQUISITOS DO SISTEMA DE GESTÃO DE ENERGIA ABNT NBR ISSO 50001	PLANTA SIC 2016
REQUISITOS GERAIS (4.1)	PARCIAL
RESPONSABILIDADE DA DIREÇÃO (4.2)	PARCIAL
POLÍTICA ENERGÉTICA (4.3)	PARCIAL
PLANEJAMENTO ENERGÉTICO (4.4)	PARCIAL
REVISÃO ENERGÉTICA (AUDITORIA) (4.4.3)	NÃO
LINHA DE BASE ENERGÉTICA (4.4.4)	SIM
INDICADORES DE DESEMPENHO ENERGÉTICO (4.4.5)	SIM
OBJETIVOS ENERGÉTICOS (4.4.6)	PARCIAL
IMPLEMENTAÇÃO E OPERAÇÃO (4.5)	PARCIAL
COMPETÊNCIA, TREINAMENTO E CONSCIENTIZAÇÃO (4.5.2)	PARCIAL
COMUNICAÇÃO (4.5.3)	PARCIAL
REQUISITOS DE DOCUMENTAÇÃO (4.5.4.1)	NÃO
CONTROLE DE DOCUMENTOS (4.5.4.2)	SIM
CONTROLE OPERACIONAL (4.5.6)	SIM
PROJETO (4.5.6)	PARCIAL
AQUISIÇÃO DE SERVIÇOS DE ENERGIA, PRODUTOS, ETC (4.5.7)	SIM
MONITORAMENTO E MEDIÇÕES (4.6.1)	PARCIAL
AVALIAÇÃO DE CONFORMIDADE (4.6.2)	SIM
AUDITORIA INTERNA DO SGE (4.6.3)	NÃO
NÃO CONFORMIDADES, CORREÇÃO, AÇÃO CORRETIVA E PREVENTIVA (4.6.4)	SIM
CONTROLE DE REGISTROS (4.6.5)	SIM
ANÁLISE CRÍTICA PELA DIREÇÃO (4.7)	PARCIAL

Capítulo 5

5 CONCLUSÃO

Conforme as análises e auditorias realizadas no ano de 2010, o projeto de substituição dos compressores da planta SiC no ano de 2012, atendeu os requisitos de redução de 25% no consumo específico de energia elétrica, como proposto no projeto original. Portanto, todos os investimentos realizados foram viabilizados.

Como possibilidade de aprimoramento deste tipo de sistema, é aconselhável a realização de auditorias a cada dois anos, para que não ocorram erros como os identificados na auditoria de 2010.

A não alteração do sistema de secagem para níveis de cotas inferiores à casa de compressores causou problemas crônicos de acúmulo de condensando no sistema de filtros coalescentes, o que ocasionou sobrecarga nas unidades de secagem de AC. A instalação do vaso de pressão principal entre a central de compressores e a central de secagem permitiria a drenagem do condensado pela parte inferior do vaso de pressão, reduzindo a utilização dos secadores. Com a instalação de purgadores temporizados este problema foi resolvido.

Os problemas relacionados ao sistema de gerencimento inteligente causaram perda de eficiência e aumento do número de horas em alívio dos compressores sem inversor de frequência. Os compressores sem inversor de frequência estavam em alívio em 20% do tempo de funcionamento, não havendo a compressão do ar. O excesso de horas em alívio será sanado através da instrumentação e interligação dos compressores ao supervisório central, permitindo a sua utilização em cascata.

É importante salientar que, a novas instalações devem, se possível, possibilitar o aproveitamento da energia térmica. A inclusão desta avaliação no projeto original permitiria uma redução significativa relativa aos custos com GLP, principalmente para o aquecimento de água, podendo até mesmo influenciar na localização física da futura instalação, pois um posicionamento mais próximo das unidades consumidoras de calor facilitará a instalação do sistema de reaproveitamento de calor.

O aproveitamento de calor para secagem de grãos geraria uma economia de cerca R$100.000,00/ano, e consequente aumento de eficiência energética e redução de emissão de CO^2 proveniente da queima de combustíveis fósseis. Como o custo dos recuperadores de calor giram em torno de R$ 180.000,00 (sem considerar tubulações e instalações), os valores podem justificar o investimento para a redução do consumo de GLP.

Dentre outras ações realizadas para aumentar o desempenho da central de AC foi a abertura de “janelas” na parte de admissão de AC da central, e a correção de válvulas direcionais da linha principal, que enviava AC sem tratamento a planta de micro abrasivos. Estas ações de fácil execução reduziram as perdas de desempenho, gastos com manutenção e problemas com a qualidade.

No caso de aplicação da ABNT NBR ISO 50001, a unidade pertence a um grupo que possui uma política energética objetiva. Porém, é necessário criar uma política local específica, além de estruturar um programa de auditoria periódicas do sistema energético. Estas auditorias deveriam servir de embasamento para investimentos futuros, com objetivo de otimizar e racionalizar o uso de energia elétrica.

5.1 REFERÊNCIAS

ABERKO. Equipamentos Industriais. Vasos de Pressão. Disponível em: <*http://www.vasosdepressao.com.br/aftercoolers*> Acessado em 03/03/2016.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Ténicas. NBR ISO 50001. Sistema de gestão da energia – Requisitos com orientação para uso. 2011.

ALMEIDA, A.; FONSECA, P.; FERREIRA,F. FALKNER, R.; REICHET, J.; TONSING,E.; MALMOSE,K.; PREVI, A.; DOMINIONI, A.; PILLO,M.; RUSSO,S.; GUISSE,F.; BLAISE,J.; CLAIR,E.; DIOP,A. Improving the Penetration of Energy-Efficient Motors ande Drivs, 2000.

ATACADÃO DAS FERRAMENTAS, 2015. Disponível em: <*www.atacadaodasferramentas.com.br*> Acessado em 22/08/2015.

ATLAS COPCO AIRPOWER NV, Compressed Air Manual 7 ed. Bélgica, 2010.

ATLAS COPCO AIRPOWER NV, Compressed Air Manual 8 ed. Bélgica, 2015.

ARDALAN, A. Economic & Financial Analysis for Engineering & Project Management, Technomic Publishing Company, Inc. Lancaster, Pennsylvania 17604 U.S.A., 2000.

CAGI. Compressed Air & Gas Inst. Compressed Air And Gas Handbook 6 Ed. Cleveland, 2003.

CAPELLI, A. Energia elétrica para sistemas automáticos da produção. São Paulo: Érica, 2007. 320 p.

CASA DA CONSULTORIA. Disponível em: <*http://casadaconsultoria.com.br/wp-content/uploads/2011/07/pdca_ferramenta-administrativa.jpg*> Acessado em 05/09/2015.

CEATI, Customer Energy Solutions Interest Group (CESIG). Ivor F. Cunha P. Eng. of LeapFrog Energy Technologies Inc. for the CEA Thechnologies Inc., 2007.

CLASP, Energy-Efficiency Labels ande Standards: A Guidebook for Appliances, Equipment and Lignting. Lead authors: WIEL, Stephen and MCMAHON, James E., Collaborative Labeling ande Appliance Standards Program (CLASP), February, 286 p., 2007.

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

ELEKTRO. Manuais ELEKTRO de Eficiência Energético- Seguimento Industrial. Disponível em :<*http://www.elektr.com.br/Media/Default/DocGalleries/Eficientiza%C3%A7%C3%A3o%20Energ%C3%A9tica/SistemasMotrizes.pdf*>. Acessado em 17/05/2015.

ESTU. Good Practice Guide N°238, London, UK, 1998.

FISH, A. Efficiently Dry Compressed Air. Hydraulics & Pneumatics. Parker Hannifin Corp, 2014.

FUPAI/ELEKTRO. Eficiência Energética. Fundamentos e Aplicações. 1 Ed. ELEKTRO; Universidade Federal de Itajubá; Excen; Fupai. Campinas, São Paulo, 2012. Disponível em:<*http://www.elektro.com.br/Media/Default/DocGalleries/Eficientiza%C3%A7%C3%A3o%20Energ%C3%A9tica/Livro_Eficiencia_Energetica.pdf*> Acessado em 01/02/2016.

GOLÇALVES, F.A.; CARDOSO, J, R. Estudo para a implantação de geração de ar comprimido com alta eficiência na Electrolux do Brasil S.A. planta Guabirotuba, UFTPR, 2007.

GORELICK, B. Enercheck Systems and Alan Bandes UE Systems Inc. The hidden costs of compressed air leaks. Hydraulics & Pneumatics, 2008.

GW EQUIPAMENTOS AMBIENTAIS, 2015. Disponível em: <*www.gwequipamentos.com.br*> Acessado em 22/08/2015.

INMETRO 2015. Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia. Programa Brasileiro de Etiquetagem. Disponível em: <*http://www.inmetro.gov.br*> Acessado em 01/06/2015.

INGERBRAS*,* 2015. Disponível em: <*www.ingerbras.com.br*> Acessado em 01/08/2015.

INGERSOLL-RAND, 2008. Disponível em < http://www.ingersollrandproducts.com/air/catalogs/125-200hp_90-160kW%20CC%20Brochure_US.pdf> Acessado em 01/02/2016.

KENT, R. "Compressed air: optimize treatment and distribution to save energy." Plastics Technology Apr. 2012. Disponível em: <http://go.galegroup.com/ps/i.do?p=AONE&sw=w&u=capes&v=2.1&id=GALE%7CA287636802&it=r&asid=7d4695a289ae586fe9ce6ae46b23c4fd> Acessado em 5 Sept. 2016.

KURIMOTO. Manufacturin the future. Disponível em : <*http://www.kurimoto.co.jp/worldwide/en/product/item/07pw/100.php*> Acessado em 15/03/2015.

MARTINS, L.G.; DÉCIO, B.; DELAIBA, A.C.; SILVA, S.F.P. GUIA DE ANÁLISE DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM SISTEMA DE AR COMPRIMIDO. Uberlândia, 2007. Disponível em: <http://www.ceel.eletrica.ufu.br/artigos2007/ceel2007_021.pdf> Acessado em:18/08/2016.

MINISTÉRIO DA FAZENDA. Taxa de Juros Selic. Disponível em <http://idg.receita.fazenda.gov.br/orientacao/tributaria/pagamentos-e-parcelamentos/taxa-de-juros-selic#Taxaselic> Acessado em 27/11/2016.

Plant Engineering. "Meeting your compressed air treatment needs." 1994. Disponível em: <*http://go.galegroup.com/ps/i.do?p=AONE&sw=w&u=capes&v=2.1&id=GALE%7CA15679173&it=r&asid=cc6a23d9ab85633eaed781f406eafbf3*> Acessado em: 05/09/2016.

OHNO, T. Toyota Production System: Beyond Large-scale Prodution. Productivity press, 1988.

PEIXOTO, D.; INDRUS IAK, M. L. S. Análise do sistema de resfriamento de uma planta de ar comprimido. Revista Liberato, Novo Hamburgo, v. 12, n. 17, p. 01-106, jan./jun. 2011.

PERRONE, F.P.D., AFONSO, S., CAVALCANTI, E.S.C., CAPELLA, P.S., A Solução no Caso Daimlerchrysler para Redução do Consumo de Energia em Sistemas de Ar Comprimido.

In: SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, 16., 2001, Campinas. Anais... Campinas: UNICAMP, 2001.

Plant Engineering ″Variable Frequency Drive Cuts Compressed Air Costs.” *(Energy Crisis)." 2001.* Acessado em: 28/08/2016.

PNEUMATIK, Equipamentos Comercial Ltda, 2008. Acessado em 07/09/2016. Disponível em < *http://www.pneumatikonline.com.br/linha_de_ar_comprimido.html*>

ROCHA, N.R. & MONTEIRO, M.A.G. Eficiência Energética e Sistemas de Ar Comprimido, Rio de Janeiro. Eletrobrás, 2005.

ROLLINS, J.P. Manual de Ar Comprimido e Gases/ Compressed Air Gas Institute. Ed. Prentice Hall. São Paulo, 2004.

SANTOS, A. C.; OLIVEIRA, P.G.R; BIANCHI, R.B.; SILVA, S.F.P.; FARIA, V.R. Estudo Comparativo entre a Eficiência Energetica de Compressores Operando com o Ar em Diferentes Temperaturas. Minas Gerais, Uberlândia, 2013. Disponivel: <*http://www.ceel.eletrica.ufu.br/artigos2013/ceel2013_024.pdf*> Acessado em: 15/08/2016.

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

SALVENDY, G. Handbook of Industrial Engineering. Technology and Operation Management, 3Ed. John Wiley & Sons, Inc. Canadá, 2001.

SHEWHART, W. A. Economic Control of Quality of Manufactured Product. 50th Anniversary Commemorative Issue American Society for Quality, 1980.

STANK AUTOMAÇÃO, 2014. Disponível em :<http://stankautomacao.com.br/wp/wp-content/uploads/2014/03/Cilindros1.jpg> Acessado em: 04/12/2015.

VENTEC, 2008. Manual técnico de Instalação, Operação e Manutenção. Disonível em <http://www.ventec.com.br/downloads/manuais_ventec/alt27-10-08/Manual_Filtro_Cartucho.pdf> , Acessado em: 10/08/2016.

WAMSLEY, G. Compressed Air: Don’t Forget It. Mechanical Engineering, 2015.

ZUERCHER, J. "What to expect from an air audit." Plant Engineering, 2003.