

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

LUCAS YULE LAGE MAFRA

**EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM COMPRESSORES DE AR
COMPRIMIDO**

VIÇOSA
2016

LUCAS YULE LAGE MAFRA

**EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM COMPRESSORES DE AR
COMPRIMIDO**

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas da Universidade Federal de Viçosa, para a obtenção dos créditos da disciplina ELT 490 – Monografia e Seminário e cumprimento do requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Mauro de Oliveira Prates.

VIÇOSA
2016

LUCAS YULE LAGE MAFRA

**EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM COMPRESSORES DE AR
COMPRIMIDO**

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas da Universidade Federal de Viçosa, para a obtenção dos créditos da disciplina ELT 490 – Monografia e Seminário e cumprimento do requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Aprovada em DD de MMMM de 20YY.

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. Dr. Fulano de Tal - Orientador
Universidade Federal de Viçosa

Prof. Dr. Ciclano Se houver - Coorientador
Universidade Federal de Viçosa

Prof. Dr. Avaliador Primeiro - Membro
Universidade Federal de Minas Gerais

Prof. Dr. Avaliador Segundo - Membro
Universidade Federal do Espírito Santo

Prof. Dr. Avaliador Terceiro - Membro
Universidade Federal do Pará

“Sonhe grande, pois ter sonhos grandes dão o mesmo trabalho dos sonhos pequenos”

(Jorge Paulo Lehman)

Dedico esta obra a minha família e a quem sempre confiou no meu trabalho

Agradecimentos

Primeiramente agradeço a minha mãe Elen, que sempre esteve ao meu lado, mesmo com as noites mal dormidas em minha ausência. Ao meu pai Emerson que sempre me deu conselhos, pessoais e profissionais, me fazendo me tornar a pessoa que sou hoje. Enfim, pela educação oferecida a mim, pelo apoio incondicional, por abrir mão de vários fatores em prol dos filhos, enfim, por serem o pilar de toda a minha vida.

A minha irmã Juliana, que mesmo com seu gênio forte, sempre esteve no meu lado nas dificuldades da vida.

A Anna Luiza, minha companheira de vida, que sempre me apoiou durante toda a jornada e sempre entendeu os sacrifícios necessários para alcançar o tal sonhado diploma de engenheiro.

Agradeço aos funcionários do Departamento de Engenharia Elétrica por terem sempre me ajudado. Aos funcionários João, Michael, Cláudio por serem sempre solícitos nas horas de dúvidas e escolhas. Agradeço também a Sirene, que sempre esteve disposta a ajudar e que sempre demonstrou felicidade no que faz, sendo uma lição para a vida.

Agradeço a todos os professores do departamento que me ajudaram nessa jornada, seja pelos desafios encontrados em suas disciplinas, que me modelaram para ser o profissional que sou hoje, mas principalmente por sempre lembrarem que no relacionamento entre o professor e o aluno tem que existir respeito. E principalmente ao professor Mauro Prates, por sempre me ajudar nos 6 anos de Viçosa, desde de dúvidas de sala de aula até dúvidas para o futuro da minha carreira, me inspirando sempre no âmbito profissional e no pessoal.

Agradeço a todos os meus amigos que fizeram parte da minha jornada, sei que cada um sabe a importância que teve durante a minha jornada e tenham a certeza que estarei aqui sempre que precisar. Porém agradeço em especial a galera do grupo “po”, por serem os amigos que estavam do meu lado 24/7, seja com conselhos profissionais e até com convites para a mesa do bar.

E por último, agradeço à Ambev, que me proporcionou um ambiente desafiador, porém respeitoso, e que me fez sempre ter gana para ser o melhor.

Sou o que sou hoje pela ajuda de todos, e sem pessoas como vocês a vida não teria sentido.

Resumo

O tema eficiência energética vem se popularizando no Brasil nos últimos anos, tanto no âmbito residencial (com campanhas de consumo consciente), como no âmbito industrial, onde a política de sustentabilidade e a preocupação ambiental fazem com que as buscas por economia sejam mais intensas. Pensando no ramo de indústrias de bebida, como a que o trabalho foi implementado, existem diversas fontes de consumo energético. Este trabalho tem como principal objetivo a identificação e a validação de oportunidades para buscar a eficiência energética em componentes de uma planta industrial, focando em circuitos de geração de ar comprimido. O trabalho está descrito detalhado, desde como foi traçado a meta, como seria feito o acompanhamento diário, até os resultados alcançados. Os focos principais foram em rotina básicas, como a retirada de vazamentos, e também na reestruturação dos planos de manutenção para buscar a excelência de funcionamento do equipamento.

Os resultados obtidos foram bastante válidos e gerou uma economia de quase 50 mil reais em somente um mês sem custo inicial, demonstrando que é possível sim fazer mais com menos.

Abstract

The topic of energy efficiency has become popular in Brazil in recent years, both in the residential (with conscious consumer campaigns) and in the industrial arena, where sustainability policy and environmental concern make the search for economy more intense. Thinking about the beverage industry, like the one that the work was implemented, there are several sources of energy consumption. This project has as main objective the identification and validation of opportunities to seek energy efficiency in components of an industrial plant, focusing on compressed air generation circuits. The work is described in detail, from how the goal was traced, passing by how the daily follow-up would be done, to the results achieved.

The main focuses were basic routine, such as the removal of leaks, and also in the restructuring of maintenance plans to seek excellence in the operation of the equipment.

The results obtained were quite valid and generated a savings of almost 50 thousand reais in only one month without initial cost, demonstrating that it is possible to do more with less.

Sumário

1	Introdução.....	13
1.1	Justificativa.....	15
1.2	Objetivos.....	16
1.2.1	Objetivo Geral	16
1.2.2	Objetivos específicos	16
1.3	Estrutura	16
2	Compressores de ar	17
2.1	Processo de Conversão do ar atmosférico para ar comprimido.....	17
2.2	Compressores de ar do tipo parafuso.....	21
2.3	Torre de Refrigeração.....	24
2.4	Variáveis de operação.....	25
2.5	Fluido de operação.....	27
2.6	Motores Elétricos.....	29
2.7	Reservatório.....	30
2.8	Secador	31
2.9	Validação do índice de verificação.....	31
3	Resultados e Discussões.....	37
3.1	Gestão de Vazamentos.....	37
3.2	Rota de Vazamento.....	40
3.3	Planos de Manutenção	41
3.5	Resultados e validação do projeto	43
4	Conclusões.....	47
	Referências Bibliográficas	48

Lista de Figuras

Figura 1 - Consumo final de energia no Brasil. Fonte: (EPE, 2016).....	14
Figura 2 - Esquema do sistema de ar comprimido. Fonte: (ROCHA; MONTEIRO, 2005a) ..	18
Figura 3 - Custo de uma instalação de ar comprimido	20
Figura 4 - Compressor do tipo parafuso utilizado em indústria	21
Figura 5 - Geometria básica do compressor parafuso e suas etapas. Fonte: (PILLIS,2005)....	22
Figura 6 - Princípio de funcionamento e o modelo de um compressor parafuso de ar. Fonte: (Atlas Copco,2010a)	23
Figura 7 - Modulação carga e alívio.....	24
Figura 8 - Torre de resfriamento.....	25
Figura 9 - Temperatura de bulbo úmido (TBU) e temperatura de bulbo seco (TBS)	25
Figura 10 - Diagrama psicrométrico de uma torre	27
Figura 11 - Diferentes modelos de reservatórios em sistemas de ar comprimido.....	31
Figura 12 - Cálculo de Energia Elétrica gasta nos compressores no Dia Atual e no Dia anterior	32
Figura 13 - Análise estatística para a validação do índice de verificação proposto	34
Figura 14 - Gestão de Vazamentos.....	37
Figura 15 - Dados da saída do reservatório relacionados com ar comprimido	38
Figura 16 - Vazão média por hora	39
Figura 17 - Energia consumida nos meses de Julho, Agosto, Setembro e Outubro.....	44
Figura 18 - Potência Total e Potência Média consumida	44
Figura 19 - Comparação do indicador de ar comprimido entre os meses de agosto e outubro	45

Lista de Tabelas

Tabela 1- Comparação da potência perdida em relação a vazamentos nas tubulações de distribuição. Fonte (ATLAS COPCO, 2010a) (PILLIS, 2005)	20
Tabela 2 - Normas de qualidade de água recirculada.....	28
Tabela 3 - Energia Consumida nos compressores e o número de vazamentos retirados no mês de Julho	33
Tabela 4 - Fluxo de ar comprimido para diferentes valores de pressão e de diâmetro de orifício.....	40
Tabela 5 - Rota de Vazamento	40
Tabela 6 - Plano de Manutenção de uma Bomba Centrífuga	41
Tabela 7 - Plano de Manutenção de um Motor Elétrico.....	42
Tabela 8 - Plano de Manutenção de uma Torre de Resfriamento	42
Tabela 9 - Plano de Manutenção de um Compressor	43
Tabela 10 - Resultados obtidos convertidos para Energia e Custo.....	46

1 Introdução

A medida que a sociedade vem se desenvolvendo, o consumo de energia vem aumentando e de forma descontrolada, onde nem sempre ocorre um controle de eficiência do aumento de carga. Além disso, a sociedade está em uma época onde a preocupação com o meio ambiente e em relação a eficiência energética estão assumindo papéis cada vez mais importantes nesses cenários, haja vista a inserção de programas que buscam a redução do gasto energético em qualquer ramo, desde redução do consumo de água em um processo produtivo até a redução de consumo de energia em uma residência domiciliar. No contexto descrito, a ideia de produzir mais, ou igual, gastando menos, ou seja, tendo uma otimização dos recursos utilizados está em evidência.

A crescente globalização no qual passa a sociedade, conseqüentemente colocando mais dispositivos eletrônicos no mercado, tem exigido uma considerável ampliação na capacidade de geração de energia. A principal função do estudo da eficiência energética é contribuir para que a redução de perdas seja a compensação para a maior demanda das empresas. Sabe-se a importância do desenvolvimento da criação de novas fontes de geração de energia, e que a tendência do futuro é a completa utilização de energias renováveis na matriz energética brasileira, porém o uso racional de energia diariamente posterga a necessidade da utilização de novas fontes. A importância da eficiência energética para o desenvolvimento sustentável de um país é enorme. Segundo a Agência Internacional de Energia, a eficiência energética é a forma mais rápida e barata de evitar uma catástrofe ambiental no futuro, com a alta demanda dos equipamentos, principalmente em países em desenvolvimento.. (GELLER, 2003)

Segundo pesquisas o Brasil poderia economizar cerca de U\$ 2,5 bilhões por ano se usasse todo seu potencial de eficiência energética. Segundo dados demonstrados em (TAYLOR, 2008) o Brasil figura em 10º lugar como maior consumidor mundial de energia e tem a tendência de duplicar seu consumo até 2030. Como o consumo de energia está diretamente associado a emissão de gases causadores de efeito estufa e a destruição da natureza, a eficiência energética deve ser tratada com prioridade no país para evitar conseqüências drásticas.

Na Figura 1, é mostrado um gráfico do consumo energético por setor no Brasil. Onde o setor industrial e os transportes totalizam mais de 70% de todo consumo final brasileiro. Mostrando também o grande impacto do setor industrial na matriz energética do país.

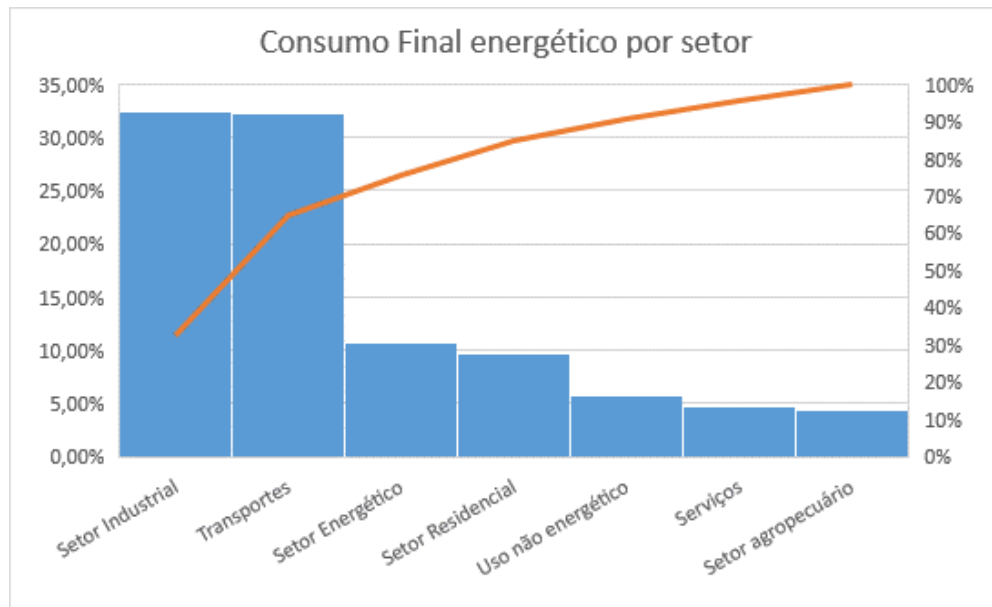


Figura 1 - Consumo final de energia no Brasil. Fonte: (EPE, 2016)

A inclusão da tecnologia, a maior importância dada pelas indústrias em relação a energia, o aperfeiçoamento dos materiais utilizados em equipamentos e novos arranjos industriais, vem contribuindo para a otimização de sistemas consumidores de energia elétrica, que juntamente com legislações implementadas, visam sempre buscar índices de energia mínimos de consumo. Como por exemplo, uma indústria automobilista possui um índice que quantifica a energia gasta por carro produzido (kwh/unidade) e uma meta é traçada para a minimização do indicador. (JANNUZI, 2000)

O aumento da produtividade em todos os setores se devem a dois fatores principais: desenvolvimento tecnológico, e uma melhor gestão energética da unidade. Ambos fatores contribuem para a maior economia financeira e que esse valor adicional seja utilizado no aumento da produtividade industrial, demonstrando ainda mais a importância de fazer mais com menos. Um fato importante do desenvolvimento tecnológico é que a legislação brasileira institui níveis máximos de consumo de energia de máquinas e aparelhos fabricados ou comercializados no país, e esse valor máximo tende sempre a diminuir, forçando as empresas a fazer investimentos em novas tecnologias.

No âmbito industrial, busca-se a eficiência energética principalmente com a especificação de equipamentos mais eficientes. O grande problema no assunto é a pequena quantidade de informações quanto a carga a ser utilizada ou o histórico de comportamento da

planta. Como um exemplo mais específico, existem indústrias que utilizam sistemas de refrigeração para resfriar etapas do processo produtivo, porém se não for realizado um estudo prévio detalhado, não se torna possível alterar as bombas de recirculação sem saber a quantidade calorífica que é necessário perder no trocador de calor. São pequenos detalhes, mas que podem atrapalhar muito o funcionamento do sistema.

1.1 Justificativa

Como é demonstrado na Figura 1, 35,3%% do consumo de energia no Brasil tem como destino final as indústrias, e a maior parte desse consumo é destinado em sistemas motrizes. Esses sistemas compreendem predominantemente os de acionamento eletro-eletrônico, motores elétricos, de acoplamento motor-carga, de cargas mecânicas acionadas (bombas, compressores, ventiladores, exaustores) e de instalações (transporte e consumo de fluidos).

Focando no setor industrial, os compressores, capazes de gerar ar comprimido, estão em praticamente todos os ramos existentes. Esse tipo de fluido é importante pois é utilizado em diversos outros equipamentos como forma de acionamento, como por exemplo ferramentas pneumáticas, acionamentos mecânicos, controle de equipamentos e em transportes.

Segundo (HANH, 2004) o primeiro registro de utilização de um compressor a pistão ocorreu em 1776 em uma fábrica na Inglaterra. Após 1900, o desenvolvimento desse equipamento se acelerou, aumentando sua capacidade para até 350 bar. Na década de 1950 surgiram os primeiros compressores a parafuso e na de 1960 os primeiros desse tipo que apresentavam eficiência similares a compressores à pistão.

Esses compressores revolucionaram a indústria de geração de ar comprimido, e juntamente com o desenvolvimento tecnológico veio o aumento do custo energético na geração do mesmo.

No caso das indústrias, a eficiência energética pode ser encontrada recorrendo-se a diferentes procedimentos, alguns dos quais serão discutidos nesse trabalho, tais como:

- Verificar vazamentos em tubulações;
- Verificar a eficiência nos motores empregados nos equipamentos;
- Adequação de inversores de frequência nos inversores.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Esse trabalho tem como principal escopo o estudo e a análise de diferentes procedimentos com o mesmo intuito: atingir a eficiência energética em um compressor de ar utilizado em uma planta industrial na indústria de bebidas.

Tendo como foco principal a identificação de oportunidades em relação a redução de consumo, e através de conceitos técnicos, apresentar quais seriam as soluções para melhoria destes sistemas.

1.2.2 Objetivos específicos

Para atingir o objetivo esperado, foram traçados alguns objetivos específicos de diferentes partes do processo e pequenas metas, tais como:

- Criação do plano de manutenção das torres de resfriamento;
- Criação do plano de manutenção das bombas centrifugas;
- Criação de plano de manutenção para compressores;
- Criação de um grupo para detecção de vazamentos em todas as áreas industriais;
- Analisar minuciosamente a rede de ar comprimido para verificar potenciais fontes de desperdício;
- Adequar a rede de ar comprimido em casos de consumos específicos.

1.3 Estrutura

O segundo capítulo desse trabalho apresenta conceitualmente todos os equipamentos que fazem parte de uma rede de ar comprimido industrial, desde a parte do tratamento de água nas torres de resfriamento até o principio de funcionamento dos compressores.

O terceiro capítulo trata da metodologia para a identificação de resultados e alguns resultados atingidos nesse trabalho prático.

O último capítulo traz as conclusões obtidas.

2 Compressores de ar

O ar comprimido é um produto dotado de energia e pressão, maior que a pressão atmosférica local, obtido de uma transformação termodinâmica do ar atmosférico através de um trabalho mecânico de compressão realizado por uma máquina térmica, chamada de compressor, assim é definido ar comprimido no conceito de (ROCHA & MONTEIRO, 2005a).

Esse ar está apto a realizar trabalho em algum instrumento e é bastante utilizado em indústrias, com a principal funcionalidade a modulação de sensores pneumáticos, acionamento mecânico e comandos de válvulas.

Na criação de ar comprimido, o processo acontece com a conversão de energia elétrica em mecânica que por sua vez comprime o ar. Assim, qualquer desperdício de ar comprimido está diretamente relacionado com a conta a ser paga no contexto de energia elétrica.

O percentual desse consumo varia de setor para setor, porque está muito relacionado com os tipos de equipamentos necessários para determinado processo produtivo. Como por exemplo, no setor de vidro, esse consumo é geralmente 20% do valor total; no de bens de capital, 12,5%; no de plásticos, 10%; no de alimentos, 9%; e no setor químico, 7%. (CAVALCANTI, 2004)

Segundo (HANH, 2004), o ar comprimido é a forma mais consumida e mais onerosa na indústria de transformação, depois somente da energia elétrica. Entretanto, a maioria dos sistemas que o recebem não fazem o tratamento correto do equipamento, passando a ser fontes de constantes desperdícios.

2.1 Processo de Conversão do ar atmosférico para ar comprimido

Para este processo, a primeira etapa é a entrada de ar atmosférico passando por um filtro primário, com o intuito de limpar a sujeira pesada, porém algumas impurezas são admitidas.

O ar atmosférico entra nos compressores, que em etapas vai elevando a pressão, fazendo com que a pressão de saída seja por volta de 6 bar. Juntamente com o aumento da pressão, ocorre o aumento da temperatura, que dependendo de qual compressor é utilizado,

podendo chegar de 85°C a 180°C na saída. Depois passa em um trocador de calor (denominado *aftercooler*), que pode ser refrigerado a água ou a ar, e a temperatura é então reduzida para 10°C ou 15° acima da temperatura ambiente, ajudando na precipitação do condensado.

No modelo utilizado nesse trabalho, o ar resfria trocando calor com a água, e essa água forma um processo fechado passando pelas torres de refrigeração (que será discutido em um tópico específico mais adiante).

Depois de ser resfriado, o ar vai para o reservatório, onde grande parte do condensado se precipita e é drenada. Em seguida o ar flui pelas tubulações de distribuição. (ROCHA & MONTEIRO, 2005b).

A Figura 2 mostra o esquema de um sistema de ar comprimido.

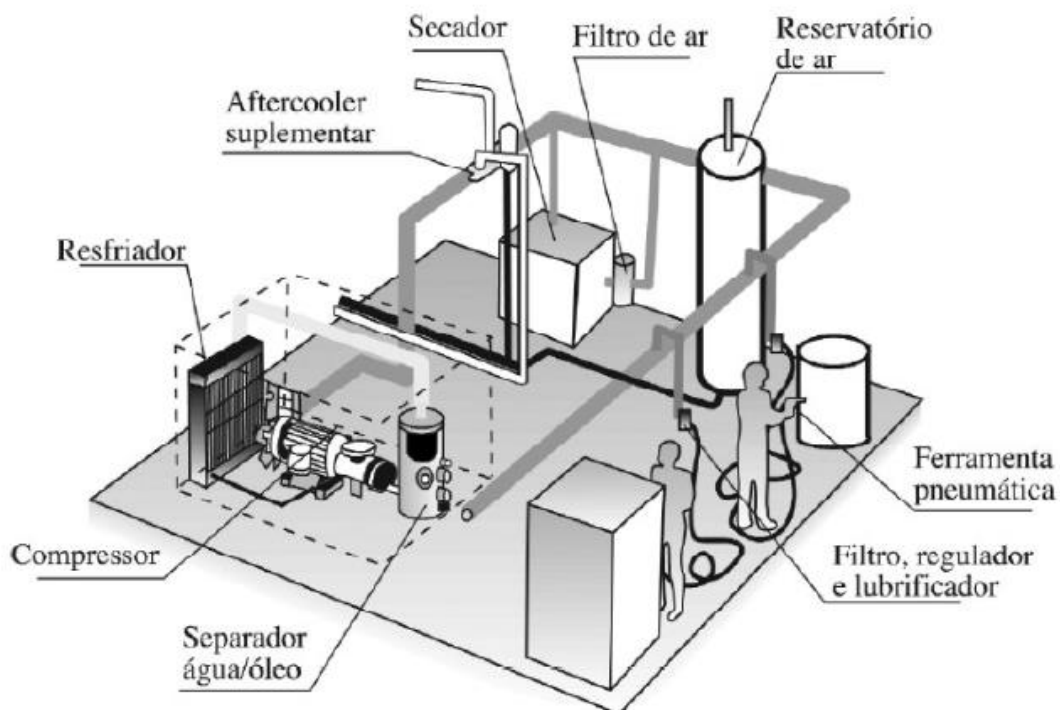


Figura 2 - Esquema do sistema de ar comprimido. Fonte: (ROCHA; MONTEIRO, 2005a)

A pressão de trabalho do sistema depende de vários fatores, sendo os principais: o compressor utilizado e a perda de carga nas tubulações até chegar no consumidor final. Um ponto muito importante é que a pressão de distribuição está diretamente relacionada com a energia elétrica consumida pelo sistema, para cada 1 bar de aumento na pressão, em média, a

potência requerida é 8% maior. Portanto, a pressão de trabalho deve ser a menor possível de forma a atender todos os consumidores.

De acordo com (ROCHA & MONTEIRO, 2005a) a queda de pressão entre o compressor e as cargas recomendada é de 5% da pressão de geração ou 0,3bar, o que for menor. É comum o uso de válvulas redutoras em equipamentos que requerem uma pressão menor de trabalho.

Outro fator importante para a manutenção da excelência operacional em um compressor de ar é a manutenção de filtros e o dimensionamento correto das tubulações. Pois tubulações subdimensionadas são mais baratas, porém eleva a velocidade do escoamento, consequentemente elevando as perdas de cargas e o custo energético. (ATLAS COPCO, 2010a)

Existem várias técnicas que ajudam a operar com uma pressão menor de distribuição, como por exemplo a utilização da tubulação de distribuição em forma de anel, a identificação dos equipamentos que são afetados com a queda de pressão e instalar tanques pulmões próximos a eles, ou a construção de duas redes de distribuição.

Além de vários parâmetros de instalação para a busca da eficiência energética, existem parâmetros que devem ser controlados no dia a dia dos compressores de ar. A recomendação é que parâmetros como a pressão, a vazão, a temperatura de saída de ar, a potência elétrica e a energia consumida sejam monitoradas diariamente ou em uma frequência maior, com o objetivo de detectar qualquer anomalia antes de danificar o equipamento.

Pensando na excelência operacional do equipamento, outro fator que interfere no consumo, tanto quanto a pressão de trabalho, são os vazamentos. O ar desperdiçado proveniente de vazamentos é, em média, mais de 10% do total produzido e deve-se sempre minimizar esse valor. Para isso, este percentual e as perdas geradas é fundamental que haja um programa de detecção, prevenção e manutenção de vazamentos. Os métodos mais utilizados para detecção são aparelhos de ultrassom e o uso de espuma. (ATLAS COPCO, 2010a)

Outro problema muito encontrado em indústria é a má utilização de ar comprimido, como na secagem, limpeza e ventilação em alguns equipamentos. O principal item de má utilização encontrado durante a realização desse trabalho foi como ventilador em painéis elétricos, onde o *cooler* queimava (custo de R\$10,00) e era utilizado uma mangueira de ar comprimido direto no equipamento, com um custo muito maior.

Além do menor consumo de energia no compressor, quando se opera com uma pressão de distribuição menor, também reduz o consumo de energia gerado por cada vazamento nas

tubulações. Um sistema operando a 6,0 bar tem o consumo com vazamentos reduzido em torno de 13%, comparado com o mesmo sistema operando a 7,0 bar. (ATLAS COPCO, 2010a)

A Tabela 1 compara o consumo dos vazamentos e a potência com pressões de 6 bar e 7 bar.

Tabela 1- Comparação da potência perdida em relação a vazamentos nas tubulações de distribuição.
Fonte (ATLAS COPCO, 2010a) (PILLIS, 2005)

<i>DIÂMETRO DO FURO (MM)</i>	<i>VAZÃO DO VAZAMENTO A 6 BAR (MM/S)</i>	<i>POTÊNCIA EXTRA REQUERIDA NO COMPRESSOR (KW) A 6 BAR</i>	<i>VAZÃO DO VAZAMENTO A 7 BAR (MM/S)</i>	<i>POTÊNCIA EXTRA REQUERIDA NO COMPRESSOR (KW) A 7 BAR</i>
1,0	1,0	0,3	1,2	0,4
2,0	10,0	3,1	11,1	4,0
5,0	27,0	8,3	31,0	10,8
10,0	105,0	33,0	124,0	43,0

A Figura 3 mostra o percentual de custos de um sistema de ar, onde o maior impacto é na energia elétrica utilizado diariamente, chegando a 73% do valor total, sendo esse valor quase 4 vezes maior que o custo da compra do equipamento. (ROCHA & MONTEIRO, 2005a)

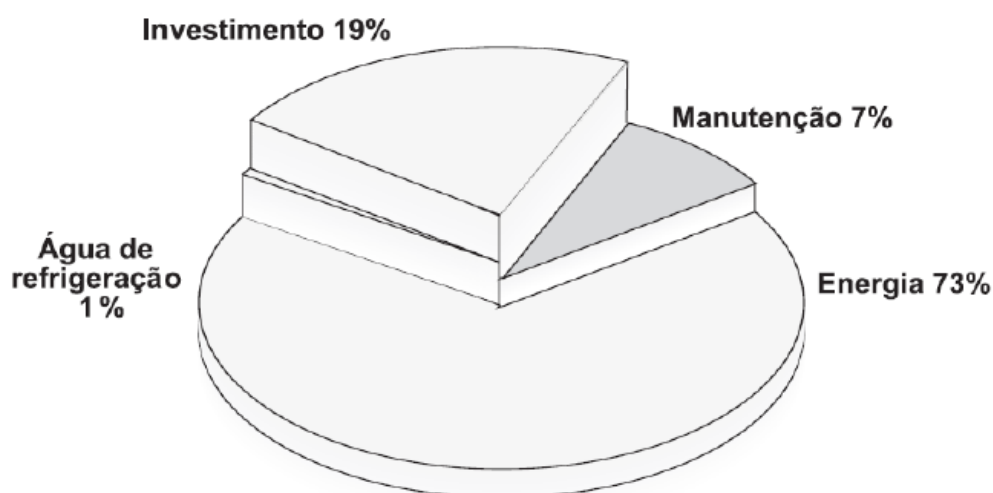


Figura 3 - Custo de uma instalação de ar comprimido

2.2 Compressores de ar do tipo parafuso

O compressor utilizado nos equipamentos do trabalho é o parafuso rotativo. É comum usá-lo para substituir o compressor de pistão, onde são necessários grandes volumes de ar de alta pressão, tanto para grandes aplicações industriais ou para operar ferramentas de ar de alta potência. A Figura 4 ilustra este tipo de compressor.

Esses tipos de compressores são amplamente utilizados em sistemas de refrigeração que requerem uma grande carga térmica, pois combinam dimensões externas reduzidas com alta capacidade. Isto porque operam em alta rotação em função de não apresentarem válvula de admissão nem de descarga.



Figura 4 - Compressor do tipo parafuso utilizado em indústria

O compressor possui duas partes primordiais para o seu funcionamento, que são dois rotores em roscas, um chamado de macho e o outro de fêmea, com diferentes números de lóbulos, onde na configuração mais usual, o rotor macho apresenta 4 e o fêmea apresenta 6. Estes rotores são montados sobre mancais a fim de fixar as respectivas posições na câmara de operação. (PILLIS,2005)

O funcionamento de um compressor parafuso está dividido em sucção, compressão e descarga.

A primeira etapa do processo de produção do ar comprimido é a sucção de ar pelos compressores. Essa sucção ocorre quando, durante a rotação dos rotores o espaço se abre entre os lóbulos e aumentam de volume, succionando o gás pela parte superior, fazendo com que o volume máximo seja preenchido e a entrada seja fechada.

A próxima etapa é a compressão, quando os rotores macho e fêmea começam a encaixar suas ranhuras, reduzindo o volume de gás e o deslocamento axialmente, em função da rotação dos parafusos. A finalização da descarga se dá quando o rotor macho ocupa o volume antes ocupado pelo gás, assim não há gás remanescente na câmara de compressão. A Figura 5 apresenta a geometria do parafuso duplo.

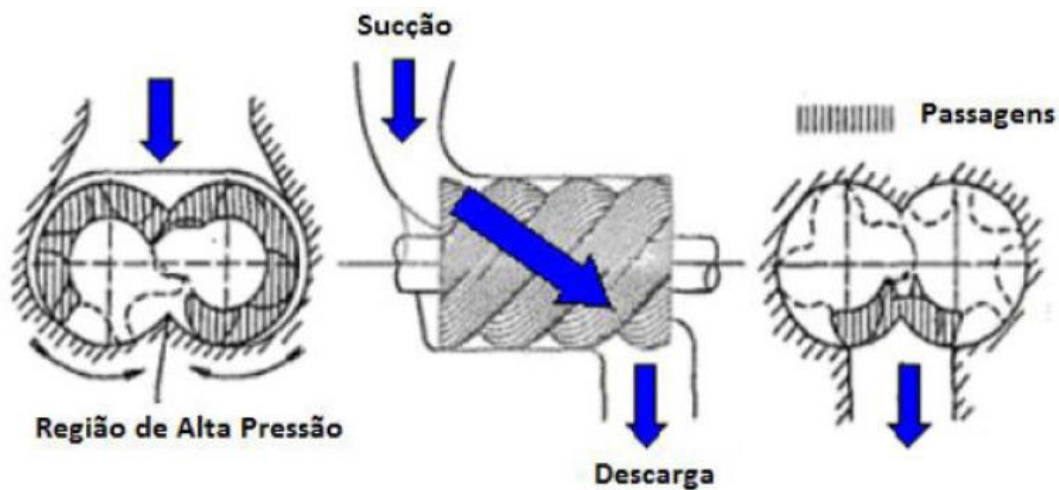


Figura 5 - Geometria básica do compressor parafuso e suas etapas. Fonte: (PILLIS,2005)

O volume entre as hélices dos parafusos são sempre decrescentes, com o intuito de diminuir o volume do ar e aumentar a pressão de saída. A relação de pressões depende, na verdade do espaçamento entre os parafusos e da forma da porta de descarga. Para a maior eficiência do conjunto, a relação deve ser adaptada para a pressão de trabalho. (ATLAS COPCO,2010b)

Conforme mostra na Figura 6, o compressor parafuso não possui válvulas, o que reduz a possibilidade de falhas, porque não há força mecânica que cause desbalanceamento. Isto significa também que o compressor pode operar com alta velocidade e combinar pequenas dimensões com altas vazões, e produzir ar comprimido em regime constante e de maneira estável, ou seja, sem pulsar, mesmo com variações de carga.

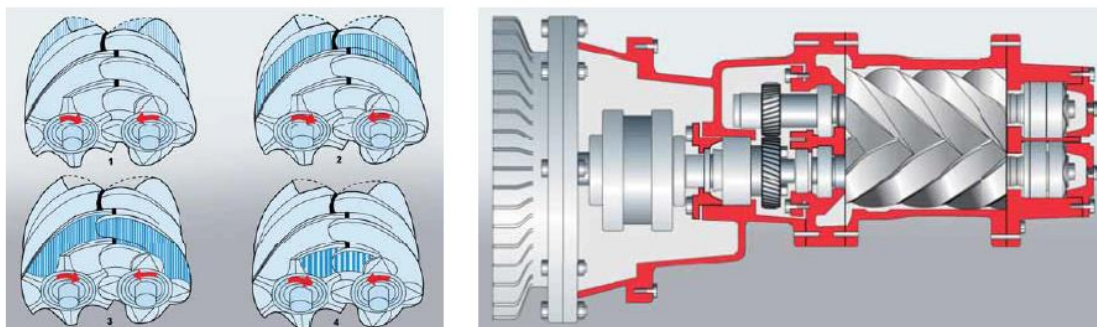


Figura 6 - Princípio de funcionamento e o modelo de um compressor parafuso de ar. Fonte: (Atlas Copco,2010a)

Nas aplicações industriais, os compressores de ar têm um objetivo: manter a pressão de distribuição uniforme e constante para atender todos os pontos de consumo. Basicamente existem dois tipos de controle para que o compressor opere na pressão adequada, sendo um com inversor de frequência, que permite o controle contínuo do motor que aciona o compressor, em função das variações de pressões, e o outros por carga e alívio, que é o controle mais comum.

No segundo controle citado (por carga e alívio) quando a pressão de carga (P_{carga}) é atingida, o pressostato envia um sinal para a solenoide, que aciona o *damper* na entrada do compressor para a posição completamente aberta. Assim o compressor entrará no processo de compressão e produzirá ar comprimido até que a pressão de alívio ($P_{\text{alívio}}$) seja atingida.

Quando $P_{\text{alívio}}$ é atingida, há uma redução da entrada de ar no sistema pelo fechamento do *damper* e conta-se um tempo determinado e, se neste intervalo determinado, a P_{carga} não for atingida, o compressor desliga automaticamente. Não existe posição intermediária para o *damper*, ou ele está totalmente aberto ou totalmente fechado. Uma técnica importante para o consumo de energia elétrica do sistema é manter a $P_{\text{alívio}}$ a menor possível, pois se ela for muito elevada vai fazer com que o compressor opere mais tempo em carga que o necessário e, dependendo do *set point*, nunca entre em alívio, aumentando o consumo. (ROCHA & MONTEIRO, 2005a)

De acordo com (ROCHA & MONTEIRO, 2005a) o aumento de 1 bar no ajuste da $P_{\text{alívio}}$ faz com que o consumo de energia elétrica aumente de 6 a 10%. A recomendação é que $P_{\text{alívio}}$ seja no máximo 0,5 bar acima da P_{carga} .

A Figura 7 apresenta a modulação por carga e alívio. Na primeira parte se tem o controle tradicional, onde o *damper* abre quando a pressão chega a um valor determinado, já

na segunda parte se dá o controle avançado onde o *damper* é mais inteligente, não deixando a pressão ultrapassar o máximo para abrir.

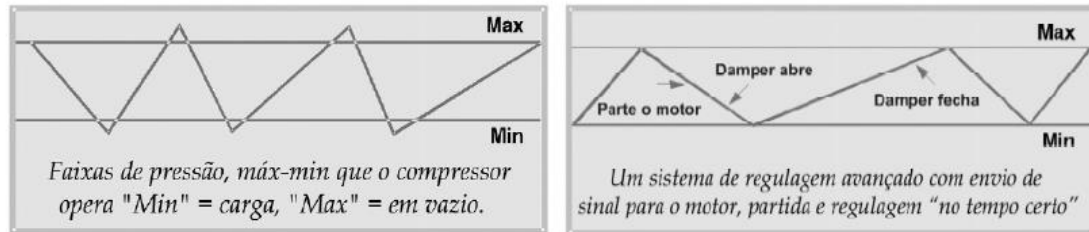


Figura 7 - Modulação carga e alívio.

2.3 Torre de Refrigeração

Em muitos processos industriais, se faz necessário à retirada de carga térmica de um sistema, e no caso estudado esse fluido era a água. Preocupando-se com a crescente escassez e também com o meio ambiente, a água “quente” deve ser reaproveitada. Para que ocorra esse reaproveitamento, ela deve passar por outro equipamento que a resfria, geralmente chamado de torre de resfriamento (“*evaporative cooling tower*”) retornando ao processo a uma temperatura ideal para o sistema em que está sendo utilizado (CORTINOVIS & SONG, 2012).

A água a ser resfriada ao retornar à torre de resfriamento é distribuída no topo por meio de bocais de pulverização. Uma corrente de ar ascendente fornecida através de ventiladores axiais é forçada simultaneamente através do enchimento, com isso ocorre a evaporação de uma pequena porção de água, removendo desta forma o calor da água remanescente. A água que agora foi resfriada é recolhida na bacia da torre, de onde será bombeada para o processo que a aqueceu.

A Figura 8 mostra uma torre de resfriamento, sendo a tubulação verde superior o local da água proveniente do processo e que será espalhada pela torre. Esse é uma torre que contém 6 ventiladores de forma axial e tem como objetivo resfriar o fluido utilizado (no caso a água) para a temperatura desejada. A tubulação verde que está à esquerda da foto é o caminho que o fluido faz para retornar ao processo através de bombas de recirculação.



Figura 8 - Torre de resfriamento

2.4 Variáveis de operação

Para o perfeito entendimento de uma torre de resfriamento, existem alguns conceitos que devem ser levados em consideração. Como o conceito de bulbo úmido e bulbo seco.

Pode-se dizer que a temperatura de bulbo seco do ar é a própria temperatura do gás (o bulbo do termômetro utilizado na medição está seco) (CORTINOVIS & SONG, 2012). Em (SALVADOR, 1999) é definida a temperatura de bulbo seco como aquela que é indicada por um termômetro comum.

Já a temperatura de bulbo úmido é aquela a qual o termômetro está envolto em uma gaze umidificada com água. Por definição é a temperatura atingida, em regime permanente, por uma certa porção de água em contato a uma corrente contínua de ar em condições consideradas adiabáticas (só ocorre troca entre o ar e a massa de água), sendo desprezados os efeitos da radiação térmica nessa troca. A Figura 9 demonstra os termômetros de bulbo seco e úmido.

As duas temperaturas se relacionam da seguinte maneira: a temperatura do bulbo úmido (que será denominado de TBU desse ponto em diante) é menor ou no máximo igual a temperatura de bulbo seco (que será denominado como TBS desse ponto em diante).

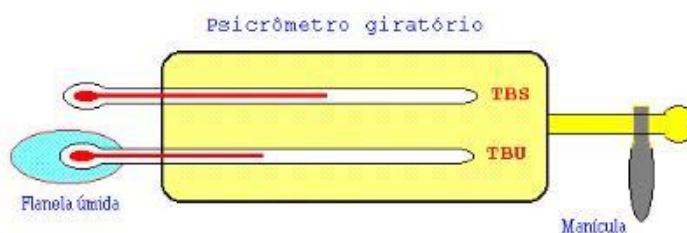


Figura 9 - Temperatura de bulbo úmido (TBU) e temperatura de bulbo seco (TBS)

Na torre de resfriamento, o processo de resfriamento da água ocorre principalmente pela evaporação de parte da água que é recirculada na torre. A evaporação da água, que é a transferência de massa em fase líquida (água) para a fase gasosa (ar) causa a diminuição da temperatura da água que é escoada ao longo da torre. A transição de massa de água para ar acontece devido às duas fases entrarem em contato e buscar o equilíbrio. Aproximadamente 80% do resfriamento acontece devido à evaporação de parte da água e os outros 20% acontece devido à diferença de temperatura entre o ar e a água.

Segundo (SALVADOR, 1999), as torres de resfriamento são equipamentos que dissipam calor de modo eficiente, pois o mesmo opera em um circuito fechado onde a água quente é proveniente do processo, se resfria e volta para o processo. Sendo assim, deve-se projetar as torres para que haja uma grande área de superfície entre a água e um grande fluxo de ar, por um certo período de tempo. Assim, as torres reduzem a temperatura por evaporação, com uma redução que depende de vários fatores: a temperatura da água que volta do processo, o perfeito funcionamento dos ventiladores, a vazão da água, a qualidade da água e outros.

O *range* é a diferença das temperaturas de entrada e saída na torre, ou seja, o quanto que a água está sendo resfriada. O *approach* é a diferença entre a água de saída da torre e a TBU. Esse valor reflete o desempenho térmico da torre, bem como esse mesmo valor se associa com o tamanho dos equipamentos a serem utilizados. Normalmente, o valor de *approach* de uma torre deve variar entre 3° e 11°C, e conforme esses valores vão diminuindo, o tamanho da torre aumenta exponencialmente. Segundo (PANKONE, 1996) a carga térmica, o *range* e a TBU são itens que afetam diretamente o tamanho da torre a ser desenvolvida.

O diagrama mostrado na Figura 10 indica as variações das condições térmicas do ar ao ser passado por uma torre de resfriamento (considerando que o ar sai da torre com uma umidade relativa igual a 100%).

O ponto E é considerado na entrada da torre e o ar encontra-se na temperatura ambiente. E na saída, no ponto A, o ar encontra-se saturado (umidade relativa de 100%). O aumento da entalpia verificado é correspondente à quantidade de calor que foi trocada com a água, provocando elevação da TBS do ar. A entalpia é a quantidade de energia contida em uma determinada substância que sofre reação, ela calcula o calor de um sistema, e no conceito de torres de resfriamento, a água varia sua temperatura quando é resfriada, aumentando assim sua entalpia, e esse aumento de entalpia pode ser visto na linha de entalpia que está no gráfico.

Torres com escoamento cruzado possuem uma característica importante, os equipamentos apresentam baixa perda de carga térmica, fazendo com que seja possível a utilização de vazões maiores de processo, aumentando assim a eficiência do equipamento utilizado.

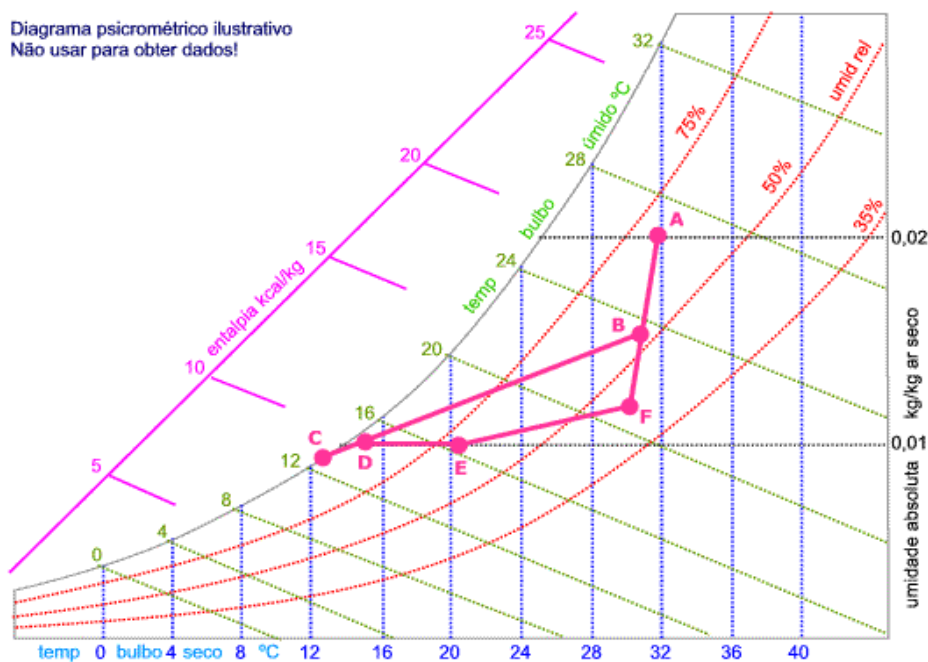


Figura 10 - Diagrama psicrométrico de uma torre

2.5 Fluido de operação

Em uma torre de resfriamento, pode-se usar diversos fluidos como fonte principal de funcionamento. Porém o mais comum é a água e a qualidade desse fluido interfere diretamente na performance do equipamento. Quando ocorre a evaporação, parte dos sólidos dissolvidos na água permanece no sistema, e depois de um tempo de uso, essa concentração se eleva e pode alcançar valores inaceitáveis, atrapalhando a troca térmica.

Além disso, contaminações biológicas e impurezas da corrente de ar se introduzem na água recirculada. Se não ocorrer um tratamento, essas contaminações podem produzir depósitos, incrustações, corrosão, reduzindo significativamente o rendimento e elevando os custos de funcionamento do sistema. Para garantir uma maior eficiência na transferência de calor e assim prolongar a vida útil do equipamento, deve-se manter a qualidade da água de acordo com a Tabela 2.

Para que haja uma prevenção no crescimento excessivo de impurezas na água recirculada, duas ações são feitas regularmente: dosagem de produtos químicos e a purga da água.

Em uma torre de resfriamento, é recomendável purgar uma quantidade de água da unidade, igual à quantidade de água evaporada. A taxa de evaporação pode ser determinada pelos seguintes métodos:

- 1- Aproximadamente 1,8 por cada 100kcal/h
- 2- Aproximadamente 1,8 por cada 4180J
- 3- Taxa evap. = Vazão da água (l/s) x diferencial (°C) x 0,0018

A vazão da purga deve ser inspecionada periodicamente para garantir que a qualidade da água se mantenha apropriada. (SEMCO EQUIPAMENTOS, 2007)

Tabela 2 - Normas de qualidade de água recirculada

Caractéristica	Limites de operação
PH	7,0 a 9,0
Dureza	30 a 500 ppm
Alcalinidade	500 ppm máx
Sólidos dissolvidos	1000 ppm máx
Cloros	125 ppm máx
Sulfatos	125 ppm máx

Em relação ao tratamento químico, algumas características são recomendadas:

- 1- Os produtos químicos empregados não devem atacar o aço galvanizado, nem a camada de Zinco. Os tratamentos de água com material químico compatível com o aço galvanizado, também oferece bons resultados com o acabamento em epóxi alumínio
- 2- Os produtos químicos devem ser introduzidos na água recirculada, mas não na bacia de água fria, e alimentados ou apoiados continuamente, para evitar concentrações elevadas que possam produzir corrosão. Normalmente, são introduzidos na linha de descarga da bomba. Colocar os produtos químicos de uma só vez, não oferece o controle adequado a qualidade da água e, portanto, não é recomendado

- 3- Não é recomendado o tratamento ácido para as unidades contruídas com aço galvanizado com acabamento epóxi alumínio. Havendo qualquer tratamento à base de ácido, este deve ser responsabilmente administrado e rapidamente neutralizado.

A utilização de purga da água e o tratamento químico tem um objetivo em comum, que é evitar contaminações e fazer o controle biológico. O surgimento de algas, umidade e outros micro-organismos, se não forem controlados podem ocasionar a redução da eficiência do sistema e pode contribuir para o surgimento de micro-organismos infecciosos, tais como Legionella, no sistema de recirculação.

2.6 Motores Elétricos

Processos de movimentação compreendem todos os tipos de acionamento mecânico utilizados na indústria. Nesse caso entra no contexto outro equipamento que é bastante utilizando: os motores elétricos, que são os responsáveis pela conversão da energia elétrica em força mecânica. Essa utilização é quase unânime na indústria, sendo descartada apenas em sistemas de segurança, onde existe a necessidade de independência da rede elétrica (suscetível a falhas).

O motor de indução de gaiola de esquilo é o tipo de acionamento mais utilizado na maioria das indústrias, sendo aplicados potências de frações de CV até altas potências em MW. É um tipo de motor simples, barato e bastante robusto, entretanto, dependendo da potência requer a utilização de componentes adicionais. Motores de indução pequenos podem ser acionados diretamente (partida direta), mas com o aumento da potência, o mesmo motor já necessita de métodos de partida específicos para não prejudicar o mesmo.

Dada a imensa quantidade de motores encontrados em plantas industriais, três abordagens simples podem gerar resultados bastante relevantes sem a necessidade de análise de cada caso em particular. São elas:

- **Análise da utilização inadequada:** quando existem alterações em variáveis do processo (como por exemplo a carga exigida, rotinas de produção, a inutilização de um determinado equipamento), algumas rotinas secundárias, que não interferem no objetivo principal, acabam sendo esquecidas. Em outras palavras é necessário do funcionamento do motor A e B para a partida da linha X, e é necessário a utilização somente do motor A para a partida da linha Y, o que acontece muito, é o esquecimento do motor B ligado quando a linha Y está funcionando, ocasionando um desperdício de energia elétrica gasta;

- Utilização de Inversores de frequência: um motor de indução tem sua potência consumida diretamente relacionada com a sua velocidade de rotação, que por consequente a sua velocidade de rotação está diretamente relacionada com a frequência utilizada na entrada do motor. Para poder alterar essa frequência, utiliza-se os inversores de frequência, que são equipamentos capazes de alterar a frequência de entrada a partir da tensão da rede. Com isso o motor não precisa sempre operar a 100% da potência nominal, abrindo um leque de novos valores possíveis;
- Análise de substituição de motores: motores antigos, com menor rendimento ou motores superdimensionados são os principais fatores de comprometimento da ineficiência na utilização de energia elétrica. O menor rendimento de motores antigos pode ser explicado por limitações tecnológicas da época de fabricação e o superdimensionamento de motores é, em geral, provenientes de inconsistências de projeto.

Embora o superdimensionamento de componentes seja comum em outras áreas da engenharia (utilizado para aumentar a segurança do sistema), para o caso particular de motores elétricos essa medida afeta o rendimento do processo. Para motores de indução, o motor pode ser considerado superdimensionado se seu fator de carga for menor que 75% de seu valor nominal. Isso ocorre porque esse tipo de motor tem seu maior rendimento com um fator de carga de 80-90%. (BORTONI, 2007)

2.7 Reservatório

Um importante equipamento em uma instalação de ar comprimido são os reservatórios, onde o ar gerado é armazenado antes de ser distribuído. Esse ar é armazenado com o intuito de suprir demandas instantâneas, flutuações e picos de cargas, permitindo que os compressores permaneçam por mais tempo ou operem de maneira contínua, sem queda brusca de pressão.

Outro ponto importante nos reservatórios são os purgadores de condensado presentes no seu inferior. O calor gerado pela compressão no ar é retirado e cedido ao meio externo que envolve o reservatório, assim o ar é resfriado e gera grande parte do condensado, que precisa ser drenado de modo contínuo. A função do purgador é dar passagem ao fluido quando atingir um certo nível de condensado em sua tubulação. A Figura 11 mostra como é um reservatório

em um circuito de ar comprimido. Nota-se que o mesmo pode variar de tamanho, sendo necessário a análise da planta para escolha do mais propício.



Figura 11 - Diferentes modelos de reservatórios em sistemas de ar comprimido

2.8 Secador

Os secadores de ar comprimidos têm como função remover o vapor de água presente no ar comprimido, tornando-o assim tecnicamente seco. Existem diversos tipos de secadores, que se diferenciam pelo processo com o qual removem o vapor de água do ar comprimido e o seu grau de secagem: por refrigeração, por adsorção, por absorção e por membrana. Sendo o último o modelo utilizado na planta onde o trabalho foi realizado.

A secagem por membrana seca o ar comprimido utilizando um meio filtrante especial (um aglomerado de tubos de fibras poliméricas tratadas quimicamente). O ar comprimido passa longitudinalmente por dentro destes tubos, não conseguindo atravessar os mesmos lateralmente. Somente a umidade consegue passar lateralmente pela membrana, alojando-se na parte externa das mesmas. Na saída do ar comprimido das membranas, é captada uma porcentagem de ar seco que retorna pelo lado externo das fibras, removendo as partículas líquidas das paredes da membrana, sendo então purgado para atmosfera. A membrana tem vida útil praticamente indefinida, desde que não exista a contaminação com óleo. Obs: Fornece ponto de orvalho pressurizado a temperatura negativa ou positiva (°C)

2.9 Validação do índice de verificação

Para iniciar esse trabalho, foi necessário criar métodos para calcular o consumo de energia dos compressores de ar presentes na indústria cervejeira. Como não existia medidor

instalado nas subestações, foi criado um medidor teórico que calculava a energia consumida a cada segundo (kWs), seguindo a equação (1).

$$P(kWs) = \frac{\sqrt{3} \cdot I_{inst} \cdot 380}{0,95} \cdot \frac{1}{3600} \quad (1)$$

A corrente instânea na equação (I_{inst}) é transmitido para o CLP através da tecnologia Ethernet. Com o dado da corrente a cada ciclo de *scan*, o CLP calcula a potência que o compressor consumiria em uma hora de uso com aquela corrente (utilizando um fator de potência 0,95, que é um valor aproximado) e faz a conversão para o consumo em segundo (divisão por 3600 na equação 1). O valor de 380 é a tensão de alimentação do compressor utilizado, e é um valor fixo.

Esse valor de consumo por segundo é então adicionado a outra TAG chamado Dia Atual, que tem como objetivo somar todo o consumo diário. No próximo segundo, outro valor é gerado para a P (kWs) e também somado a TAG Dia Atual, e assim por diante. O final da contagem acontece às 00:00 de todo o dia, onde esse valor agregado da TAG Dia Atual é transferido para a TAG D-1, recomeçando a contagem na primeira variável. Os valores das TAG's são mostrados na Figura 12. O objetivo de haver dois valores diferentes é para facilitar a anotação dos dados do dia anterior, criando um histórico de consumos diários.

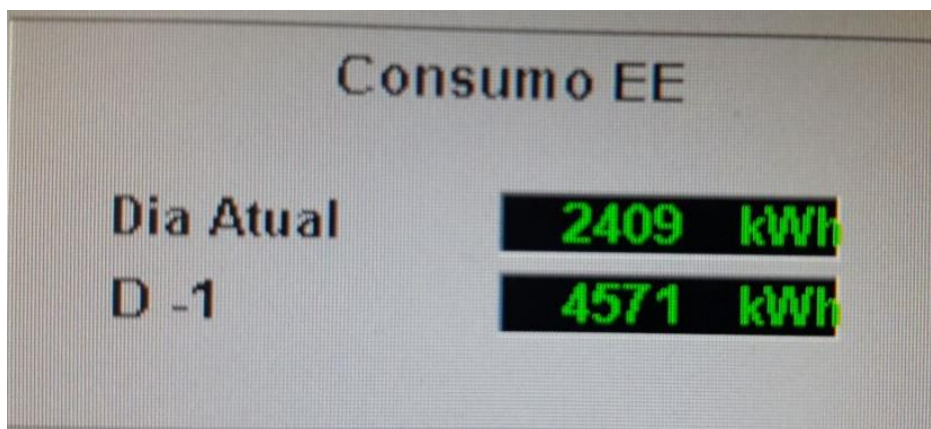


Figura 12 - Cálculo de Energia Elétrica gasta nos compressores no Dia Atual e no Dia anterior

A criação do método para o cálculo teórico desse consumo começou em julho de 2016. Em posse de um histórico de consumo durante todo esse mês, o primeiro passo do trabalho foi dado: a validação da importância dos itens de verificação.

Conversando com especialistas e funcionários antigos da cervejaria, era comum a relação entre o consumo de ar comprimido com o número de vazamentos presentes na planta.

Porém não existia esse acompanhamento do número de vazamentos retirados e também não existia dados comprovando essa correlação.

Para registrar o índice de verificação escolhido, utilizou-se o sistema ERP (*Enterprise Resource Planning*, que é um software que tem como objetivo integrar todos os dados e processos de uma empresa). Esse sistema existe na companhia para definir o fluxo de manutenção que acontece da seguinte forma: o operador vê um problema e abre uma nota no sistema, que é entregue ao programador. Este profissional detalha a nota recebida e a transforma em Ordem de Manutenção, programando um técnico para solucionar a anomalia, que trata de corrigir o problema, e finaliza a ordem de manutenção. Portanto, existe um histórico de notas relacionadas a retirada de vazamentos no sistema. Dessa forma, é possível saber, por exemplo, quantos vazamentos de ar foram retirados a cada dia de um determinado mês.

Em posse dos dados de consumo do mês de Julho, e utilizando o sistema ERP para quantificar o número de vazamentos retirados no mesmo mês, foi realizada uma análise estatística correlacionando ambos os valores. A Tabela 3 mostra os dados utilizados.

Tabela 3 - Energia Consumida nos compressores e o número de vazamentos retirados no mês de Julho

<i>Data</i>	<i>Energia Consumida nos compressores (kWh)</i>	<i>Número de vazamentos retirados em todas as áreas</i>	<i>Data</i>	<i>Energia Consumida nos compressors (kWh)</i>	<i>Número de vazamentos retirados em todas as áreas</i>
01/jul	9094,20	4	17/jul	6633,20	1
02/jul	9224,15	4	18/jul	12313,05	10
03/jul	9013,70	3	19/jul	12333,75	12
04/jul	11797,85	3	20/jul	12298,10	10
05/jul	12758,10	16	21/jul	12329,15	13
06/jul	13215,80	21	22/jul	12332,60	10
07/jul	12064,65	5	23/jul	12095,70	7
08/jul	12284,30	9	24/jul	12095,70	8
09/jul	11956,55	5	25/jul	12340,65	18
10/jul	3165,95	0	26/jul	12338,35	17
11/jul	12239,45	7	27/jul	10166,00	2
12/jul	12337,20	13	28/jul	10166,00	4
13/jul	12315,35	11	29/jul	6921,85	2
14/jul	12324,55	12	30/jul	7778,60	3
15/jul	12328,00	11	31/jul	10938,80	5
16/jul	12294,65	10			

Para validação dos parâmetros levantados, foi utilizado um software muito utilizado nas indústrias, o Minitab. É um programa gratuito criado na Universidade de Pensylvania para fins estatísticos, e tem como objetivo facilitar o dia a dia do setor corporativo, facilitando correlacionar duas variáveis. A Figura 13 mostra o resultado final obtido nessa análise.

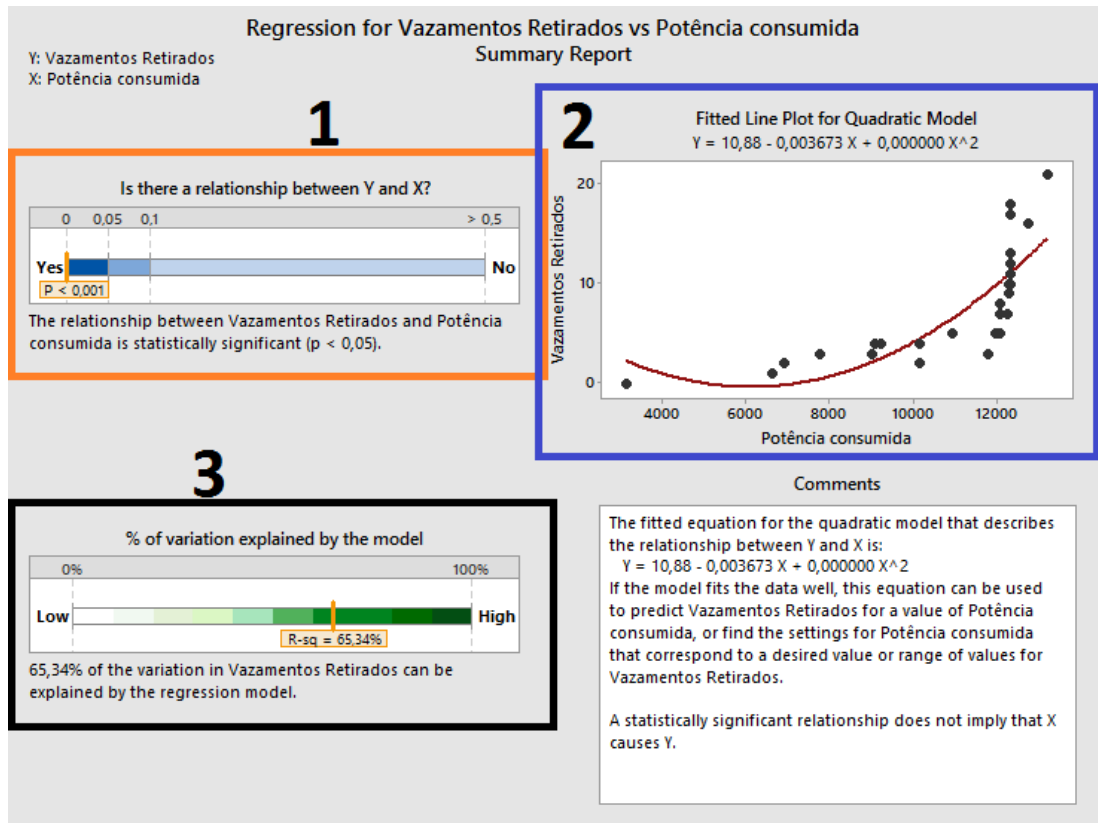


Figura 13 - Análise estatística para a validação do índice de verificação proposto

A parte circulada em 1 na Figura 13 mostra uma análise para a validação da hipótese proposta (que a energia consumida nos compressores depende do número de vazamentos retirados), denominada como significância estatística que denomina a probabilidade de que um resultado ocorreu por acaso. O valor obtido foi menor que 0,001, isso significa que existe menos de 0,1% de chance das duas variáveis terem essa relação por acaso, e 99,9% de chance de possuírem relações concretas.

A parte circulada em 2 na Figura 13 ilustra uma curva com regressão de modelo quadrático, que é uma técnica que permite explorar e inferir a relação de uma variável dependente com variáveis independentes específicas. A análise da regressão pode ser usada como um método descritivo da análise de dados sem serem necessárias quaisquer suposições acerca dos processos que permitiram gerar os dados. Regressão designa também uma equação matemática que descreva a relação entre duas ou mais variáveis. A equação que correlaciona a

energia consumida com o número de vazamentos também é demonstrada na Figura 13, demonstrando que as duas variáveis são dependentes.

Por último, a parte circulada com 3 na Figura 13 é denominado como R-quadrado (também conhecido como coeficiente de observação), que é uma medida de ajustamento entre o modelo de regressão encontrado com os valores reais das amostras. Quanto maior esse valor significa que há uma maior aproximação entre os valores reais com a curva de regressão definida. O valor encontrado para R-quadrado foi de 65,34%.

Observa-se que a correlação entre o número de vazamentos retirados e a potência é positiva, conseqüentemente pode-se dizer que quanto maior o número de vazamentos da fábrica, maior será a potência consumida pelos compressores. É evidente que existem vários outros fatores que interferem na potência consumida, como por exemplo: a temperatura do ar succionado, a limpeza dos filtros presentes, o perfeito funcionamento das válvulas pneumáticas, a temperatura de água da torre de resfriamento, entre muito outros. Porém, essa análise estatística foi realizada com um número de amostrar bons (30 amostras), e nenhuma manutenção pontual foi realizada no sistema de ar comprimido.

Portanto, como toda análise estatística que é realizada, foi demonstrado que existe quase 70% de chance de a hipótese ser validada. Fazendo com que uma das vertentes de trabalho seja a gestão de vazamentos: como será demonstrado nos próximos tópicos.

2.10 Limitações encontradas

No próximo capítulo desse trabalho será discutido os resultados encontrados. Porém, é importante citar as limitações encontradas no desenvolvimento.

O trabalho foi desenvolvido em uma indústria cervejeira, com 7 linhas de produção para envasamento de cerveja e 2 salas de produção do líquido. Conseqüentemente, existem mais de 10 mil atuadores pneumáticos na indústria, fazendo com que o ar comprimido seja um recurso de extrema necessidade.

É importante ressaltar que existia somente um medidor de ar comprimido em toda a planta. Portanto, como vai ser demonstrado a seguir, somente era levantado um valor por dia do totalizado produzido, não conseguindo quantificar o quanto cada linha gastou. Com isso, o trabalhou limitou-se a buscar alternativas para economizar energia gasta na geração de ar comprimido e não no consumidor final.

Nos tópicos anteriores foi demonstrado que era calculada a energia consumida a partir da corrente de entrada do equipamento. Não é o melhor jeito, porque na fórmula era utilizado

fator de potência fixo e tensão de entrada fixa (que não acontece na vida real), porém é uma aproximação boa a ser utilizado, dado que seria possível investir dinheiro em um medidor próprio para potência. Porém, existem banco de capacitores na entrada da subestação para manter o FP fixo em 0,95, e existem planos de manutenção capazes de detectar uma variação maior de 1% no tensão nominal de saída da subestação, portanto a aproximação pode ser utilizada.

Outro fato importante é que não tem como saber o quanto do total produzido é perdido em vazamentos. Como não existem medidores específicos em cada linha, existem mais de 10 mil atuadores pneumáticos e cada sensor trabalha com uma diferente pressão, é quase impossível quantificar o necessário de ar comprimido para que o processo funcione normalmente. Tal cálculo é proposto como trabalho futuro.

Vale ressaltar que, mesmo não sendo possível quantificar o desperdício relacionado com vazamentos, foi mostrado na seção anterior que existe sim uma relação entre o número de vazamentos presentes na planta com a energia consumida. Esse trabalho então possuiu duas vertentes: a primeira era a gestão de vazamentos e a segunda era o plano de manutenção. Onde não era possível separar os resultados alcançados em cada um, mas no próximo capítulo será demonstrado que o objetivo foi alcançado: economizar energia na geração.

3 Resultados e Discussões

O trabalho foi dividido em duas frentes de trabalho que serão apresentados a seguir: gestão de vazamentos e plano de manutenção.

3.1 Gestão de Vazamentos

Sabendo que o número de vazamentos é importante para um melhor rendimento do compressor de ar, foi criado um grupo de pessoas com um único objetivo: colocar na rotina a busca e a retirada de vazamentos em suas áreas (não necessariamente vazamentos só de ar comprimido, mas também outros tipos de desperdícios energéticos. No entanto, será discutido somente a quantidade de vazamentos relacionados com ar comprimido, que é o objetivo deste trabalho).

A base do grupo denominado Vazamento Zero era simples: uma pessoa por área da companhia deveria adicionar na sua rotina o acompanhamento de vazamentos, e dependendo do que era feito no mês, a área ganhava ou perdia pontos. No final do mês, a área com maior pontuação ganhava brindes enviados pela empresa. A Figura 14 mostra a evolução da gestão de vazamentos entre os meses de julho a setembro.

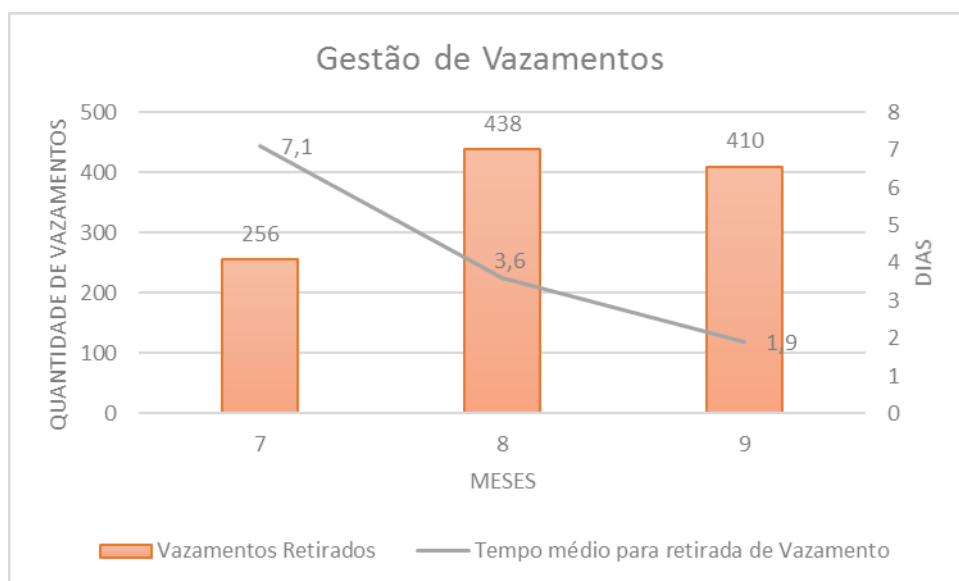


Figura 14 - Gestão de Vazamentos

Na Figura 14 é mostrado duas grandes evoluções voltadas para esse quesito: a primeira é a quantidade de vazamentos retirados que subiu de 256 em julho para 438 em agosto e depois para 410 em setembro, um crescimento de mais de 60% do número de vazamentos retirados; a segunda é o tempo médio para retirada de vazamentos. Esse índice era medido da seguinte forma: quando a nota era aberta no ERP começava a contar o tempo, e esse tempo parava de contar quando essa nota era encerrada (que só podia ser encerrada quando a anomalia fosse retirada completamente). Assim, no mês de julho, o tempo médio para correção do vazamento foi de 7,1 dias, enquanto que no mês de setembro, esse tempo foi de somente 1,9 dias. Isso mostra uma maior conscientização dos funcionários em respeito a importância no corte de desperdícios.

Outro ponto importante para acompanhamento da evolução do projeto é demonstrado na Figura 15, onde é mostrado no supervisório 3 diferentes dados: o primeiro é a TAG PT001 e é um transmissor que calcula a pressão de saída do reservatório; o segundo é a TAG FIT001 que calcula a vazão instantânea de saída do reservatório, e o terceiro (TAG FQIC001) é um totalizador de vazão, que mostra o valor acumulado até ser resetado manualmente.

Cada uma das três TAG's possuem uma importância diferente, mas ajudam no controle diário do indicador. A pressão de trabalho na saída do reservatório é controlada com o objetivo de mantê-la menor possível, pois a pressão de saída está diretamente relacionada com a energia consumida. Controla-se a vazão instantânea para detectar qualquer variação no valor nominal e agir no tratamento da causa.

Utilizando a TAG FQIC001, criou-se um controle do total de ar comprimido diário produzido, para o controle de vazão por hora e comparar mês a mês. A Figura 16 demonstra essa relação de produção de ar mês a mês.

A Figura 16 mostra que a vazão média de produção de ar comprimido diminuiu a partir das ações realizadas durante esse trabalho, sendo uma delas a retirada de vazamentos.



Figura 15 - Dados da saída do reservatório relacionados com ar comprimido

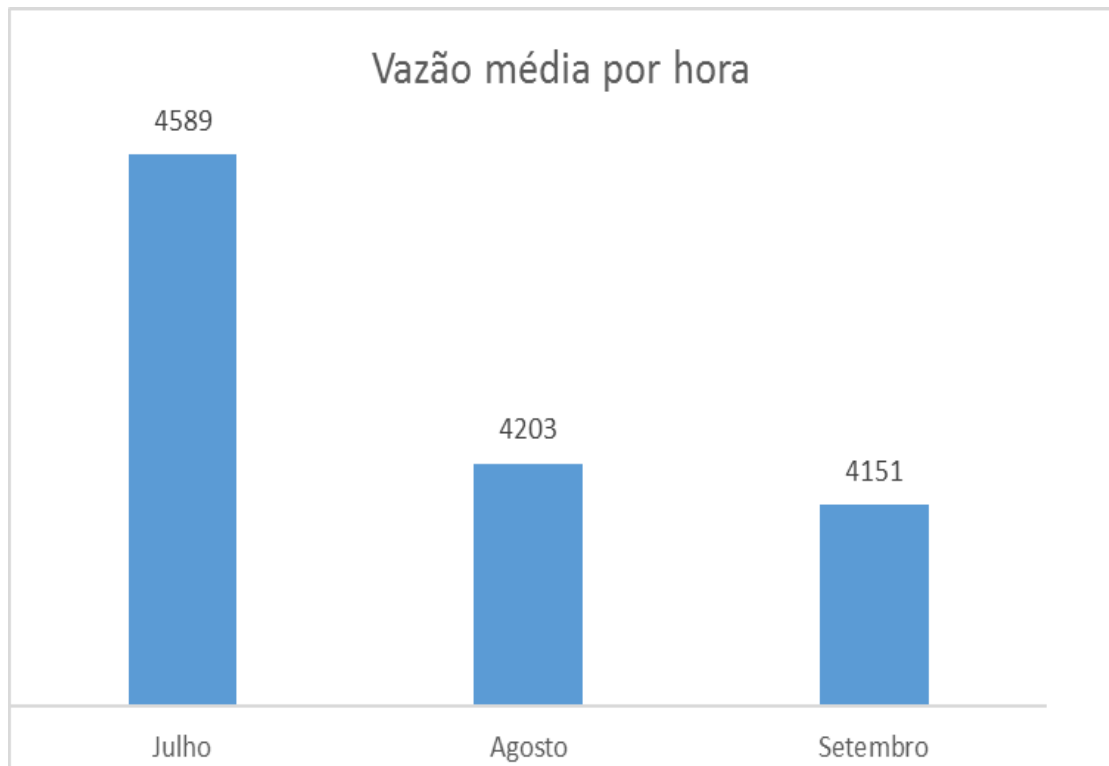


Figura 16 - Vazão média por hora

Outro método que foi desenvolvido durante o estágio, para maior conscientização das pessoas, foi a criação de uma tabela capaz de calcular o consumo por hora em relação a um vazamento. A Tabela 4 associa a pressão de trabalho com o diâmetro do orifício de vazamento. Para calcular a perda em um dia relacionado aquele vazamento é utilizado a Equação 2.

$$P(kw/h) = \frac{Pn_{compr.}(Fluxo_{Ar}).60.(n_{vazam.})}{Vazão_{nom}} \quad (2)$$

A potência de trabalho do compressor era fixa, tendo o valor de 45kW na planta utilizada. Já o fluxo de ar, encontrado na Tabela 4, está associado com o diâmetro do orifício e a pressão de trabalho. A vazão nominal também possuía valor fixo (4500m³/h). Utilizando a equação (2), foi possível ver o impacto de um vazamento e conscientizar os operadores na importância da retirada do mesmo.

Como foi mostrado anteriormente, a potência consumida pelos compressores varia de acordo com o número de vazamentos presentes na planta. Porém foi fixado o valor de 45kW por ser o valor nominal do motor, considerando que o compressor está operando sempre a plena carga. Mesmo sendo um valor teórico, fica nítido a alta potência consumida em relação a cada vazamento.

Tabela 4 - Fluxo de ar comprimido para diferentes valores de pressão e de diâmetro de orifício
Fluxo de ar comprimido (m³/min)

Diâmetro do orifício (mm)	Pressão de trabalho em bar				
	2	3	4	5	6
0,10	0,0003	0,0004	0,0005	0,0005	0,0006
0,20	0,0011	0,0015	0,0018	0,0022	0,0025
0,30	0,0025	0,0033	0,0041	0,0049	0,0057
0,50	0,0068	0,0091	0,0113	0,0135	0,0158
1,00	0,0272	0,0362	0,0452	0,0541	0,0631
1,50	0,0613	0,0815	0,1020	0,1220	0,1420
2,00	0,1090	0,1450	0,1810	0,2170	0,2520
3,00	0,2500	0,3260	0,4060	0,4870	0,5680
4,00	0,4360	0,5790	0,7230	0,8650	1,0100
5,00	0,6810	0,9050	1,1300	1,3500	1,5800
6,00	0,9810	1,3040	1,6300	1,9500	2,2700
12,00	3,9200	5,2200	6,5000	7,7800	9,0900
15,00	6,1300	8,1500	10,2000	12,2000	14,2000
20,00	10,9000	14,5000	18,1000	21,7000	25,2000
25,00	17,0000	22,6000	28,2000	33,8000	39,5000
30,00	24,5000	32,6000	40,6000	48,7000	56,8000
35,00	35,4000	44,4000	55,3000	66,3000	77,3000
40,00	43,6000	57,9000	72,3000	86,5000	101,0000
45,00	55,2000	73,3000	91,3000	110,0000	128,0000
50,00	68,1000	90,5000	113,0000	135,0000	
55,00	82,4000	109,5000	136,0000		
60,00	98,1000	130,4000			

3.2 Rota de Vazamento

Pensando em aumentar a conscientização de todos da empresa, criou-se uma rota de vazamento por área e por equipamento. Assim, semanalmente (variando o operador responsável) era realizada uma rota em cada equipamento, analisando todas as possíveis fontes de desperdícios. Um exemplo dessa rota é demonstrado na Tabela 5.

Tabela 5 - Rota de Vazamento

<i>Check de Vazamento</i>			
Equipamento	Fluido	Descrição	Status (OK/NOK)
		Verificar a existência de vazamento na tubulação e válvulas	

Despaletizadora de Caixas	Ar	Verificar a existência de vazamento na central pneumática	
		Verificar a existência de vazamentos nas mangueiras pneumáticas	
		Verificar a existência de vazamentos nos atuadores pneumáticos do cabeçote	
	Água	Verificar a existência de vazamento na tubulação e válvula de entrada da mangueira ao lado do equipamento	

3.3 Planos de Manutenção

Outra vertente do trabalho foi a criação de planos de manutenção com o intuito de buscar a maior eficiência dos equipamentos presentes do circuito completo de ar comprimido. Os focos principais foram os equipamentos que consomem a maior energia. As Tabelas de 6 a 9 mostram para cada equipamento, a condição de trabalho para a realização do teste, os limites de operação e as possíveis causas para resolução da anomalia.

Tabela 6 - Plano de Manutenção de uma Bomba Centrífuga

<i>Equipamento: Bomba Centrífuga</i>			
O que checar?	Status	Limites de operação	Possíveis Causas
Verificar a condição física da carcaça	Parado		1- Desalinhamento do rotor 2- Cavitação 3- Vibração excessiva
Verificar fixação da bomba	Parado		1- Desalinhamento entre eixos 2- Empenamento do eixo
Verificar nível de óleo da bomba	Parado		1- Lubrificação ineficiente 2- Vazamento
Verificar alinhamento do conjunto motor e bomba	Parado		1- Vibração 2- Lubrificação insuficiente
Verificar a integridade da válvula de retenção e bloqueio	Parado		1- Vedação ineficiente 2- Vibração excessiva 3- Sujidade na sede da válvula
Executar termografia no mancal	Rodando	Entre 50°C e 90°C deve avaliar as possíveis causas Acima de 90°C deve-se parar	1- Cavitação 2- Desbalanceamento do rotor 3- Acoplamento desalinhado

		o equipamento na hora para relição da troca	4- Recalque entupido 5- Enpenamento do eixo
Medir vibração em diferentes pontos	Rodando	$\geq 1,8$ mm/s – Avaliar as possíveis causas $\geq 4,0$ mm/s – Parar o equipamento na hora	1- Desabalanceamento do rotor 2- Peças frouxas 3- Ressonância 4- Rolamentos danificados
Verificar se as válvulas de sucção e descarga estão 100% abertas	Rodando	$<100\%$ aberta – Verificar as possíveis causas ao lado	1- Bomba com especificação acima da necessária 2- Inversor de frequência abaixo da nominal

Tabela 7 - Plano de Manutenção de um Motor Elétrico

Equipamento: Motor Elétrico

O que checar?	Status	Limites de operação	Possíveis Causas
Medir Tensão elétrica entre as três fases do painel	Rodando	≥ 399 V – Avaliar Causa ao lado ≤ 361 V – Avaliar causa ao lado	1- Sobretensão induzida ou capacitiva nos condutores 2- Defeito nos reguladores de tensão 3- Deficiência de aterramento
Medir as correntes elétricas das três fases do motor	Rodando	\geq Corrente nominal – Avaliar causa ao lado	1- Defeito nos rolamentos 2- Defeitos no estator do motor 3- Defeitos no redutor
Fazer termografia no disjuntor trifásico	Rodando	$\geq 70^\circ\text{C}$ – Avaliar causa ao lado	1- Oxidação do contato 2- Parafuso ou porco espanado 3- Sobrecarga em uma fase

Tabela 8 - Plano de Manutenção de uma Torre de Resfriamento

Equipamento: Torre de resfriamento

O que checar?	Status	Limites de operação	Possíveis Causas
Avaliar a tensão das correias das torres	Parado	Diferente de 10mm por metro de flexão – verificar a possível causa ao lado	1- Ajuste inadequado da correia 2- Correia desalinhada 3- Tempo de vida ultrapassado 4- Polia gasta
Verificar alinhamento da transmissão entre as polias	Parado	$<0,5$ mm para cada 100mm de diâmetro de polia – Verificar possíveis causas ao lado	1- Polia solta 2- Alinhamento mal realizado 3- Polia gasta

Verificar a limpeza dos filtros das torres	Parado		1- Tratamento químico da água 2- Falta de limpeza na bacia da torrex
Verificar a uniformidade de pulverização dos bicos aspersores	Rodando		1- Sujidade nos filtros 2- Defeito na bomba de recirculação 3- Bicos obstruídos
Verificar ruídos anormais no sistema	Rodando		1- Não realização da análise preditiva 2- Vazamento de água no sistema girante

Tabela 9 - Plano de Manutenção de um Compressor

Equipamento: Compressor			
O que checar?	Status	Limites de operação	Possíveis Causas
Checar diferencial de pressão no filtro de sucção de ar no compressor	Rodando	$\geq 0,05$ bar de perda – Avaliar possível causa ao lado	1- Falta de limpeza periódica 2- Alta sujidade no local de trabalho
Checar diferencial de pressão no filtro de óleo	Rodando	$\leq 1,4$ bar – Avaliar possível causa ao lado	1- Operação além do limite de especificação do filtro 2- Óleo lubrificante acima do tempo de troca de óleo 3- Utilização de óleo incorreto
Checar temperatura do óleo do compressor	Rodando	$> 50^{\circ}\text{C}$ – Avaliar possível causa ao lado	1- Incrustação no resfriador de óleo 2- Baixa pressão de água no resfriador 3- Temperatura alta da água da torre
Checar temperatura de água na entrada com compressor	Rodando	$> 28^{\circ}\text{C}$ – Avaliar possível causa ao lado	1- Incrustação no resfriador de óleo 2- Baixa pressão de água no resfriador 3- Temperatura alta da água da torre

3.5 Resultados e validação do projeto

Utilizando os dados do medidor de energia instalado no supervisório, levantou-se uma curva de consumo dos compressores analisados para os meses de julho, agosto, setembro e outubro, conforme pode ser observado na Figura 17. Nesta figura, é possível ver como era alto o consumo no começo do trabalho (Julho) e posteriormente o resultado das ações apresentadas: meses de Agosto, Setembro e Outubro.

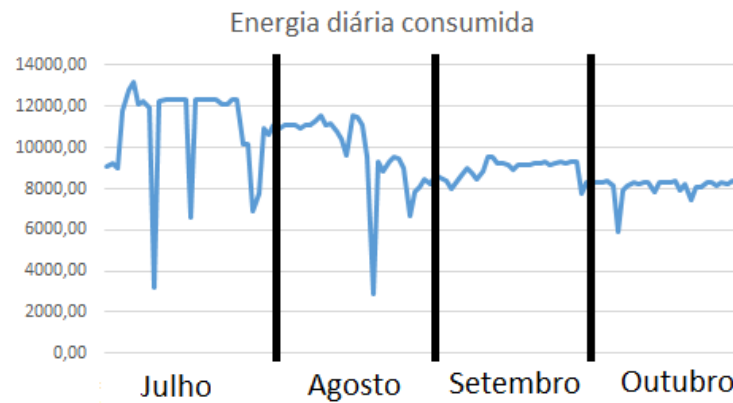


Figura 17 - Energia consumida nos meses de Julho, Agosto, Setembro e Outubro

Outra resultado importante é mostrado na Figura 18. Demonstra a energia total consumida no mês (somando cada dia), que caiu de 341Mwh em Julho para 251,38 Mwh em Outubro, gerando uma economia de 90 Mwh, ou R\$31.500,00 (considerando o preço do Kwh em R\$ 0,35)

Outro resultado importante que pode ser tirado da Figura 18 está na energia média consumida durante os meses: foi de 11,016 Mwh em julho para 8,107 Mwh em Outubro, uma redução de 26%.

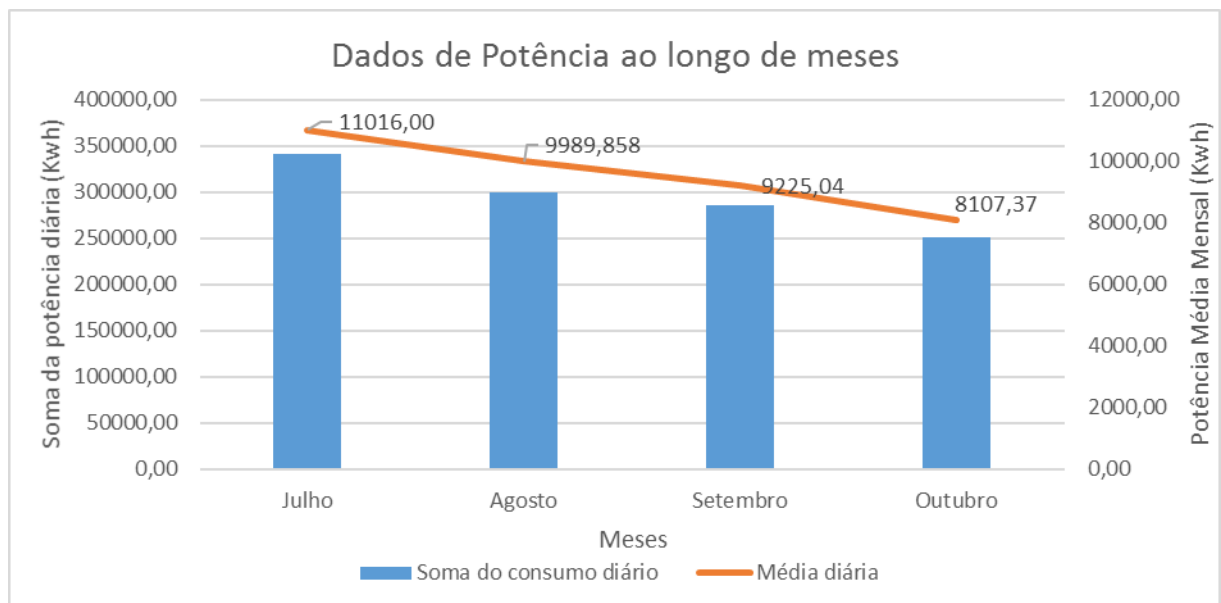


Figura 18 - Potência Total e Potência Média consumida

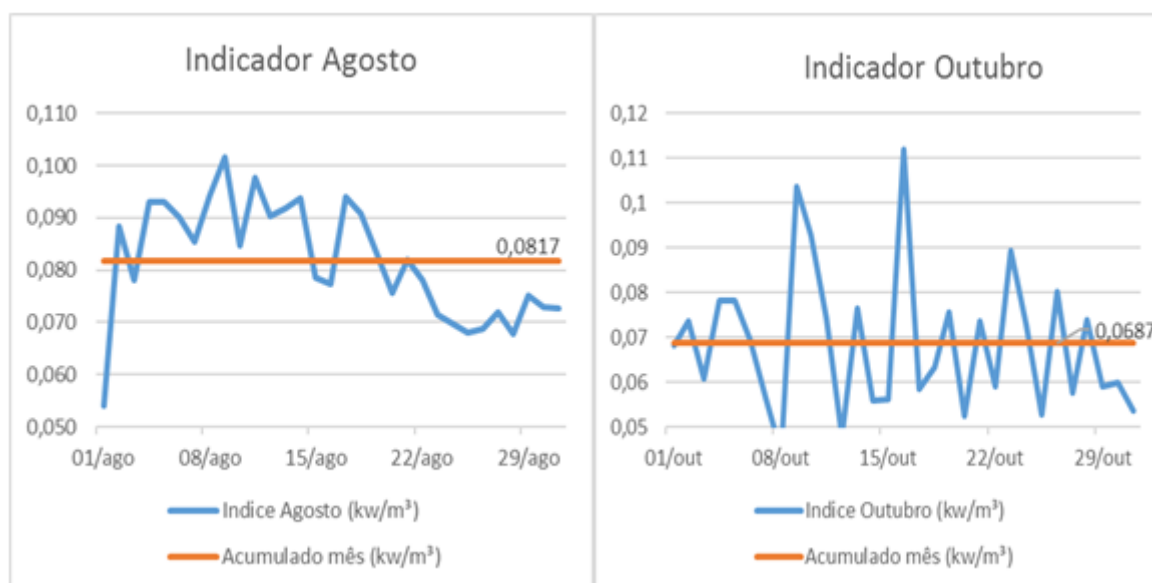


Figura 19 - Comparação do indicador de ar comprimido entre os meses de agosto e outubro

Durante o projeto foi criado um indicador de ar comprimido que é dado pela seguinte equação:

$$I(kw/m^3) = \frac{\text{Energia_Consumida_Diária}}{\text{Produção_ar_diária}} \quad (3)$$

Onde ambos dados eram gravados no supervisor (como mostra as Figuras 12 e 15) e anotadas diariamente para comparação. A Figura 19 mostra os resultados obtidos, a comparação do indicador dia após dia, nos meses de Agosto (início de trabalho) para Outubro (Validação dos métodos propostos). É mostrado também o indicador por dia e o acumulado no mês (somatório de toda a energia gasta no mês dividido pelo somatório do totalizador de produção no mesmo mês). No mês de agosto o indicador acumulado foi de 0,0817 kw/m³ e no mês de outubro foi de 0,0687kw/m³, gerando uma economia de 0,013 kw/m³.

Para finalizar a análise da eficiência energética proposta, a Tabela 10 resume o quanto foi economizado com as seguintes ações realizadas durante esse projeto:

- 1- No mês de setembro foram retirados 410 vazamentos de diferentes diâmetros de orifício. Se no mês de outubro a planta estivesse com 400 vazamentos sem tratamento, e com o diâmetro de 6 mm, teria gerado um gasto de 27.240 Kwh a mais de energia (utilizando a Equação 2), que convertido para a moeda brasileira geraria um prejuízo de R\$9.535,00.
- 2- No mês de julho, demorava 7,1 dias para a retirada de um vazamento, já no mês de setembro esse valor caiu para 1,9. Considerando que 1000 vazamentos demorariam

5,2 dias a mais para serem retirados (entre os meses de julho, agosto e setembro), teríamos um gasto de 11.577 Kwh a mais de energia (ou R\$ 4.051,95). Esse valor foi obtido utilizando a Equação 2 para calcular quanto de energia era consumida por dia com 1000 vazamentos, e depois multiplicado por 5,2 dias.

- 3- No mês de agosto o indicador acumulado foi de 0,0817 kw/m³ e no mês de outubro foi de 0,0687kw/m³, gerando uma economia de 0,013 kw/m³. O totalizador de produção no mês de Outubro foi de 3.814.967 m³. Se o consumo aumentasse 0,013 Kw por cada m³ produzido, geraria um acréscimo no consumo de 49.594 Kwh, que geraria um prejuízo de R\$17.358,10 para a empresa.

Tabela 10 - Resultados obtidos convertidos para Energia e Custo

<i>Resultados Finais</i>		
	Perda em Energia	Kwh = R\$0,35
Retirada de 400 vazamentos com 0,1mm em um mês	27.240 Kwh	R\$ 9.535,00
Se demorasse 7,1 dias para resolver 400 vazamentos ao invés de 1,9 dias	11.577 Kwh	R\$ 4.051,95
Consumo de 0,0817kw por m³ gerado em Outubro ao invés de 0,0687kw/m³	49.594 Kwh	R\$ 17.358,10
Total	88.408 Kwh	R\$ 30945,10

4 Conclusões

Esse trabalho apresentou um estudo de eficiência energética nos compressores de ar comprimido de uma grande multinacional. Após as análises e utilização de medidas corretivas, pode-se concluir que de uma forma geral, os objetivos foram alcançados.

Como todo o trabalho foi voltado com um único objetivo de reduzir o consumo de energia elétrica nos compressores, sem a necessidade da realização de investimentos, foram explorados todos os meios técnicos e conhecimentos disponíveis para chegar a excelência operacional, desde do funcionamento de bombas de recirculação, até o uso do produto pelo consumidor final. Demonstrado que cada detalhe importa, e o resultado vem com a rotina aplicada.

O foco principal do trabalho foi no sistema de geração de ar comprimido. Porém, como foi discutido anteriormente, diversas limitações foram encontradas para o totalizado de cada linha. E como trabalho futuro, fica proposto um foco maior no consumidor final e no sistema de distribuição de ar comprimido. Juntos (geração, distribuição e utilização) são os fundamentos de um sistema de ar comprimido, e é capaz criar melhorias em todos os três.

Não há a possibilidade de vivermos sem ar comprimido nos processos industriais, mas devemos ser muito cuidadosos na forma de trabalhar com ele. Devemos fazer sempre com que esses custos energéticos sejam os menores possíveis. Isto nos fará profissionais melhores e mais valorizados.

Referências Bibliográficas

- BORTONI, E. d. (2007). *Motor oversizing outlook*. Seul: In: PROCEEDING OF INTERNACIONAL CONFERENCE ON ELECTRICAL MACHINES AND SYSTEMS.
- CAVALCANTI, E. (2004). *Uso de ar comprimido no setor industrial: análise de oportunidades de redução do consumo de energia*. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA. Uberlândia: SNPTEE.
- COPCO, A. (2010a). *Compressor Air Manual*. Wilrijk - Belgium: Atlas Copco Airpower NV.
- COPCO, A. (2010b). *Manual de instruções do ES 130*. São Paulo : [s. n.].
- CORTINOVIS, G., & SONG, T. W. (2012). *Funcionamento de uma torre de resfriamento*. São Paulo: EPUSP.
- EPE. (Junho de 2016). *Balanço Energético Nacional 2016 - BEM 2016*. Fonte: EPE.gov: https://ben.epe.gov.br/download/Relatorio_Final_Ben_2016.pdf
- EQUIPAMENTOS, S. (2007). *VXC - Condensadores Evaporativos, Catálogo Técnico*. São Paulo.
- GELLER, H. S. (2003). *Revolução Energética: Políticas para um futuro sustentável*. Rio De Janeiro: Relume Dumará.
- HANH, A. (2004). *Eficiência Energética Industrial. Compressores: guia avançado*. Eletrobás/Procel.
- JANNUZI, G. M. (200). *Políticas públicas para eficiência energética e energia renovável no novo contexto de mercado: uma análise da experiência dos EUA e do Brasil*. Campinas: [s.n].
- PANKONE, T. (1996). *Cooling towers basics*. Jornal HPAC Engineering.
- PILLIS, J. (2005). *Screw Compressors Basics, YORK Refrigeration - Technical Description of FV19D - SABROE REFRIGERATION AB*. Joinvile: Tradução e Adaptação da Engenharia de Aplicação da Divisão de Contrato YORK.
- ROCHA, N. R., & MONTEIRO, M. A. (2005a). *Eficiência Energética em Sistemas de Ar comprimido*. Rio de Janeiro: Eletrobás.
- ROCHA, N. R., & MONTEIRO, M. A. (2005b 87p). *Eficiência Energética em sistemas de ar comprimido - Manual prático*. Rio de Janeiro: Eletrobás.

SALVADOR, F. (1999). *Projeto de um sistema de refrigeração industrial com Set Point variável*. São Paulo: Dissertação (Mestrado em Engenharia Eletrônica) - Escola Politécnica, USP.

TAYLOR, R. P. (2008). *Financing Energy Efficiency*. Washington DC, USA.