

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ENGENHARIA DE ENERGIA

**EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM UM SISTEMA DE AR COMPRIMIDO**

por

**Guilherme Ramires Alves**

Monografia apresentada à Comissão de Graduação do Curso de Engenharia de Energia da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Bacharel em Engenharia de Energia.

Porto Alegre, Dezembro de 2018.



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
ENGENHARIA DE ENERGIA

EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM UM SISTEMA DE AR COMPRIMIDO

por

Guilherme Ramires Alves

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS  
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE  
**BACHAREL EM ENGENHARIA DE ENERGIA.**  
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA

Prof. Prof. Dr. Roberto Chouhy Leborgne  
Coordenador do Curso de Engenharia de Energia

Orientador: Prof. Dr. Roberto Chouhy Leborgne

Banca examinadora:

Prof. Dr. Andrés Armando Mendiburu Zevallos – DEMEC / UFRGS  
Eng. Me. Diogo Angelo Stradioto – EDP Soluções em Energia  
Prof. Dr. Roberto Chouhy Leborgne – DELAE / UFRGS

Porto Alegre, 11 de dezembro de 2018.

## **AGRADECIMENTOS**

Dedico esse trabalho aos meus pais, Julio e Laura, pelo amor incondicional, educação e suporte durante a minha vida.

Agradeço aos familiares e amigos pelo carinho e apoio durante a longa jornada da graduação.

Agradeço à minha amiga e companheira Fernanda, por compartilhar alegrias e estar ao meu lado em todos os momentos.

Agradeço aos meus colegas e professores do curso de Engenharia de Energia que tornaram essa experiência única.

ALVES, G. R. **Eficiência Energética em um Sistema de Ar Comprimido**. 2018. 27 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia de Energia) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

## RESUMO

A presente monografia descreve uma avaliação de eficiência energética em um sistema de ar comprimido de uma indústria metalúrgica localizada no município de Cachoeirinha – Rio Grande do Sul. Primeiramente o trabalho realiza uma revisão dos principais conceitos de medição e verificação de performance utilizados em projetos do Programa de Eficiência Energética da ANEEL, além de uma revisão das principais medidas de conservação de energia aplicadas à sistemas de ar comprimido na indústria. A segunda parte do trabalho é um estudo de caso que tem por objetivo estimar o potencial de eficiência energética do sistema de ar comprimido da indústria escolhida utilizando a modelagem da bibliografia de referência. Para a realização dessa avaliação, foram coletados dados do conjunto motor-compressor, consumo de energia do sistema, processos da planta industrial, custos com energia e produção da fábrica. Em seguida, foram analisadas as medidas de eficiência energética oportunas de acordo com as características do sistema estudado, seus potenciais de economia e redução de custos. Analisou-se o impacto no consumo de energia do sistema e na consequente economia financeira para duas ações de eficiência distintas e para ambas simultaneamente, sendo elas o reparo de vazamentos de ar e a troca do controle de pressão de carga/alívio pela tecnologia de controle de variação de velocidade (VSD, do inglês). Por último, são apresentados os indicadores econômicos das soluções como o Valor Presente Líquido (VPL), Taxa Interna de Retorno (TIR) e *payback* descontado. A redução de vazamentos e a utilização do controle VSD, trazem um potencial estimado de economia de energia de 31% e 29,4%, e *payback* descontado 0,17 e 3,83 anos, respectivamente, e as medidas conjuntas apresentam potencial de 51,3% de redução no consumo com *payback* descontado de 2,14 anos.

**PALAVRAS-CHAVE:** Eficiência Energética, Estudo de Caso, Sistemas de Ar Comprimido.

ALVES, G. R. **Energy Efficiency in a Compressed Air System**. 2018. 27 pages. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia de Energia) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

## ABSTRACT

This report describes an energy efficiency assessment in a compressed air system in a metallurgical industry located in Cachoeirinha - Rio Grande do Sul. First, the paper reviews the main concepts of measurement and verification of performance in projects of ANEEL's Energy Efficiency Program, as well as a review of the main measures of energy improvement opportunity to industrial compressed air systems. The second part of the paper is a case study whose objective is to estimate the energy efficiency potential of the compressed air system of the chosen industry using the reference literature modeling. For the evaluation of this efficiency, data were obtained of the motor-compressor set, system energy consumption, industrial plant processes, energy costs and factory production. Then, were analyzed suitable energy efficiency measures according to the characteristics of the system studied, their potential for savings and cost reduction. The impact on the energy consumption of the system and the consequent money savings were analyzed for two different efficiency actions and for both simultaneously, the repair of air leaks and the change of load/unload control pressure by the variable speed drive (VSD) technology. The reduction of leakage and the use of the VSD control have an estimated energy saving potential of 31% and 29,4%, and discounted payback of 0,17 and 3,83 years, respectively, and the joint measures have an energy saving potential of 51,3% with discounted payback of 2,14 years.

**KEYWORDS:** Energy Efficiency, Case Study, Compressed Air Systems.

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	1
1.1	Contexto e Motivação .....	1
1.2	Objetivos.....	2
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....	3
2.1	Medição e Verificação de Performance.....	3
2.2	Sistemas de Ar Comprimido.....	8
2.3	Eficiência energética em sistemas de ar comprimido .....	10
3	METODOLOGIA .....	15
4	ESTUDO DE CASO .....	16
4.1	Características da indústria .....	16
4.2	Características do compressor.....	16
4.3	Ações de eficiência energética:.....	17
4.4	Medições.....	17
4.5	Potencial de Economia de Energia .....	18
5	ANÁLISE ECONÔMICA.....	21
6	CONCLUSÃO .....	22
7	TRABALHOS FUTUROS .....	23

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Gráfico de custos de sistemas de ar comprimido ao longo da vida útil.....	2
Figura 2 - Gráfico modelo genérico de consumo energético obtido através de regressão linear. ....	4
Figura 3 - Gráfico de histórico de consumo para determinação de energia economizada. ....	5
Figura 4 - Diagrama das Etapas de M&V dos projetos do PEE.....	7
Figura 5 - Visão tridimensional de uma instalação de ar comprimido.....	9
Figura 6 - Diagrama esquemático do sistema de controle por <i>VSD</i> . ....	13
Figura 7 - Curva característica: Carga com conjugado variável do tipo quadrático. ....	13
Figura 8 - Curva característica: Carga com conjugado constante. ....	14
Figura 9 - Curva característica: Carga com potência constante. ....	14
Figura 10 - Gráfico de potência e vazão percentual para diferentes tipos de controle.....	15
Figura 11 - Diagrama Esquemático da Metodologia Empregada.....	16
Figura 12 - Perfil de consumo do compressor no decorrer de 1 (um) dia. ....	18
Figura 13 - Perfil de consumo do compressor no decorrer de trinta minutos.....	18
Figura 14 - Estimativa de economia com a redução de vazamentos. ....	19
Figura 15 - Estimativa de economia com a instalação do controle <i>VSD</i> . ....	20
Figura 16 - Estimativa de economia com a instalação do controle <i>VSD</i> e redução de vazamentos. ....	20
Figura 17 - Gráfico Investimento versus Economia anual e payback descontado. ....	22
Figura 18 - Evolução do VPL acumulado para os três investimentos.....	22

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Usos do ar comprimido nos setores industriais. ....	1
Tabela 2 – Opções de medição do PIMVP.....	6
Tabela 3 - Usos não apropriados de ar comprimido e sugestões de alternativas.....	10
Tabela 4 - Características do sistema de ar comprimido escolhido.....	17
Tabela 5 - Medições de tempo de carga e alívio do compressor. ....	17
Tabela 6 - Dados verificados: tempos de carga e alívio, volume e vazão média. ....	20

## LISTA DE SÍMBOLOS

### *Subscritos e acrônimos*

AEE	Ação de eficiência energética
M&V	Medição e verificação
PEE	Programa de eficiência energética
PIMVP	Protocolo internacional de medição e verificação de performance
TIR	Taxa interna de retorno
TMA	Taxa mínima de atratividade
VPL	Valor Presente líquido
VSD	Variable Speed Drive

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Contexto e Motivação

O crescimento econômico e social traz consigo qualidade de vida para as pessoas às custas de um consumo de energia cada vez maior. No Brasil, de acordo com EPE (2017) o consumo de energia elétrica vem aumentando a uma taxa média de 3,3% ao ano na última década. Atualmente, o setor industrial brasileiro detém a maior participação na demanda por energia do país, com aproximadamente 33% no consumo total de energia, e 37,6% do consumo de eletricidade (EPE, 2017). O aumento da utilização de energia se apresenta como um grande desafio técnico e econômico para atender à crescente demanda. A eficiência energética, que consiste em usar de modo eficiente a energia para a realização de uma tarefa ou ação, bem como aumento da infraestrutura física dos sistemas elétricos, surgem como medidas para garantir o fornecimento energético futuro. Nesse contexto, a eficiência energética, principalmente em âmbito industrial, vem se tornando uma importante ferramenta para assegurar o suprimento de energia.

Sistemas de ar comprimido são uma das utilidades mais comuns e energeticamente intensivas empregadas na indústria, e em alguns casos específicos, torna-se a única forma de energia utilizada por suas características de segurança e confiabilidade. Possui usos em diversos segmentos industriais, mostrados na Tabela 1.

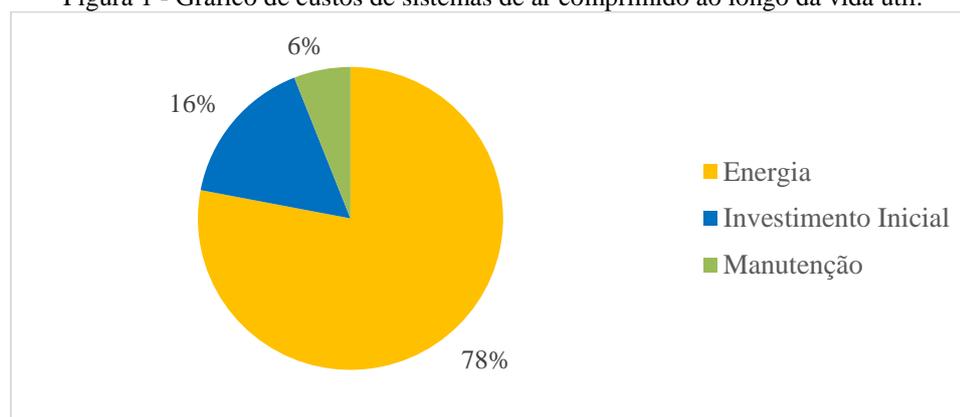
Tabela 1 – Usos do ar comprimido nos setores industriais.

<b>Indústria</b>	<b>Usos de Ar Comprimido</b>
Alimentos	Desidratação, envasamento, controles e atuadores, pulverização, limpeza, embalagem a vácuo
Automotivo	Ferramentas, estampagem, controles e atuadores, formas, transporte
Borracha e Plástico	Ferramentas, fixação, controles e atuadores, formas, injeção de molde, prensagem de moldes
Cerâmica, Vidro e Brita	Transporte, mistura, controles e atuadores, sopro e moldagem, resfriamento
Fabricação Geral	Fixação, estampagem, ferramentas, limpeza, controles e atuadores
Madeira	Serras, içamento, fixação, tratamento com pressão, controles e atuadores
Metais: Fabricação	Estação de montagem, ferramentas, controles e atuadores, injeção de molde, pulverização
Metais: Primário	Fusão à vácuo, controles e atuadores, içamento
Moveleira	Pistola de ar, ferramentas, fixação, pulverização, controles e atuadores
Papel e Celulose	Transporte, controles e atuadores
Petróleo	Processo de compressão de gases, controles e atuadores
Química	Transporte, controles e atuadores
Têxtil	Agitação, fixação, transporte, automação, controles e atuadores, tecelagem, fiação, texturização
Vestuário	Transporte, fixação, ferramentas, controles e atuadores, equipamentos automatizados

Fonte: Adaptado de US DOE, 2016.

No entanto, o custo da energia dessa utilidade é uma das mais elevadas da indústria, visto que o ar deve ser tratado de várias maneiras, filtrado, comprimido e resfriado antes de ser transportado e finalmente utilizado como vetor de energia. Além disso, do custo total ao longo da vida útil de um sistema de ar comprimido, o custo com energia frequentemente representa cerca de 70% a 80%, conforme mostrado na Figura 1. Em muitas instalações de ar comprimido frequentemente há uma significativa e inutilizada possibilidade de economia de energia que inclui redução da pressão de trabalho, redução dos vazamentos e otimização da operação através da correta seleção do controle, recuperação de calor, entre outras. Dessa forma, pode ser considerado um dos principais sistemas alvos ao realizar ações de eficiência energética na indústria (Atlas Copco, 2015; MOUSAVI, S. *et al*, 2014; BENEDETTI, M *et al*, 2018).

Figura 1 - Gráfico de custos de sistemas de ar comprimido ao longo da vida útil.



Fonte: Adaptado de Atlas Copco, 2015.

No Brasil, existem alguns programas governamentais que vêm sendo implementados com o intuito de propagar ações de conservação de energia. Dentre esses programas, pode-se citar os seguintes: o Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE), coordenado pelo Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (INMETRO) que fornece informações sobre o desempenho dos produtos para que os consumidores realizem compras conscientes; o Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL) que promove ações de eficiência energética em diversos segmentos da economia; o Programa Nacional de Racionalização do Uso dos Derivados do Petróleo e do Gás Natural (CONPET) que fomenta a racionalização e a eficiência no consumo de derivados de petróleo e gás natural (EPE, 2016). Dentre essas iniciativas, destaca-se o Programa de Eficiência Energética (PEE) criado através da Lei nº 9991 de 2000 e regulado e gerenciado pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). A ANEEL, através do PEE, determina que as concessionárias e permissionárias de distribuição de energia elétrica apliquem 0,5% de sua receita operacional líquida anual em projetos de eficiência energética de unidades consumidoras da sua área de concessão. Dessa forma, o PEE visa promover o uso eficiente da energia em equipamentos, processos e usos finais através de projetos que possuam grande potencial de redução de consumo e viabilidade econômica. Como objetivos finais, encontram-se a demanda evitada, o incentivo ao mercado de eficiência energética e a melhora dos hábitos e práticas relacionados ao consumo de energia no país (EPE, 2016). Apesar dessas iniciativas, as indústrias brasileiras têm baixa competitividade frente ao mercado internacional devido ao alto custo de produção, que se deve principalmente ao insumo energia. Um estudo realizado pelo *American Council for an Energy-Efficient Economy* (ACEEE, 2016), classificou as dezesseis maiores economias do mundo em termos de eficiência energética, colocando o Brasil em 15º com base em 31 indicadores, distribuídos por quatro setores: esforços nacionais de eficiência energética, construções, transporte e indústria, sendo o setor da indústria a pior pontuação entre os países avaliados.

Nesse contexto, estudos de eficiência energética em aplicações industriais como os sistemas de ar comprimido, baseados em uma metodologia sólida e eficaz contribuem com a competitividade do setor industrial brasileiro. De modo a auxiliar no entendimento e aplicação de boas práticas nos sistemas de ar comprimido industriais, esse trabalho realiza um estudo de caso de eficiência energética numa planta fabril.

## 1.2 Objetivos

Geral: Realizar um estudo de caso de eficiência energética em um sistema real de ar comprimido de uma indústria.

Específicos:

- Revisar as possibilidades de eficiência energética mais utilizadas em sistemas de ar comprimido industrial, bem como os conceitos de M&V utilizados no PEE.
- Estimar o potencial de eficiência de um sistema de ar comprimido real.
- Avaliar a viabilidade econômica das ações de eficiência propostas.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 Medição e Verificação de Performance

Em projetos de eficiência energética a quantidade de energia economizada não pode ser medida diretamente, uma vez que representa ausência de energia, dessa forma necessita de uma abordagem mais criteriosa dos resultados e praticada por todos. Como ferramentas para esse propósito, existe o IEEE 739 (1995), o guia ASHRAE 14 (2002) e o PIMVP (2012).

#### ▪ Protocolo Internacional de Medição e Verificação de Performance (PIMVP)

A Organização de Avaliação de Eficiência (EVO, do inglês *Efficiency Valuation Organization*) desenvolveu o Protocolo Internacional de Medição e Verificação de Performance (PIMVP), um guia que é hoje a maior referência em padronização de métodos de quantificação de resultados de investimentos em eficiência energética. Medição e Verificação (M&V) é o processo de usar medições para determinar, de forma confiável, a economia real gerada em uma instalação ou equipamento. Para quantificar a economia de energia resultante de uma ação de eficiência energética, seu efeito energético deve ser separado do efeito energético da variação de outros fatores relevantes. Caso contrário, sem os ajustes necessários a economia de energia estimada para o longo prazo pode se apresentar com valores subestimados ou superestimados em relação à realidade. O aumento ou diminuição da produção de uma fábrica é um fator que pode ocultar o real benefício dessa ação, por exemplo (EVO, 2012). A utilização de uma referência técnica internacionalmente aceita na avaliação desses investimentos, como o PIMVP, torna o projeto mais competitivo ao reduzir a percepção de risco aos financiadores e investidores (Leite, 2012).

De maneira geral, o PIMVP apresenta uma estrutura e define termos usados na determinação da economia de energia; especifica os tópicos a serem abordados em um Plano de M&V. Permite flexibilidade na elaboração de Planos de M&V, desde que mantendo os princípios de: Precisão, Completude, Conservadorismo, Consistência, Relevância e Transparência, termos que guiam as análises e são definidos no próprio protocolo. As terminologias dos conceitos mais utilizados pelo PIMVP são apresentadas de maneira sucinta a seguir de acordo com EVO (2012).

#### **Ação de Eficiência Energética:**

A ação de eficiência energética (AEE) é a própria intervenção no sistema, que o tornará mais eficiente em relação ao seu estado anterior.

#### **Variáveis independentes:**

São fatores que podem mudar regularmente e impactar o consumo de energia. Relacionam-se diretamente com o uso da energia em uma instalação, ou seja, a variação desse fator explica a variação no uso da energia. Como exemplo, a temperatura ambiente externa pode ser a variável independente que descreve o consumo de energia em um sistema de ar condicionado, assim como a produção mensal de peças no caso do uso de energia numa fábrica. Esses fatores são utilizados para determinar o modelo matemático que reproduz o consumo de energia de um sistema.

#### **Fatores Estáticos:**

São fatores que também afetam o uso da energia, mas espera-se que não variem e por isso não entram no modelo, como por exemplo a expansão de uma fábrica ou reforma. Quando esses fatores deixam de ser estáticos, fazem o modelo necessitar de um ajuste.

#### **Linha de Base Energética**

A Linha de Base Energética é o conjunto de dados medidos antes da AEE, consumo e variáveis independentes, que darão origem ao modelo matemático de previsão de consumo.

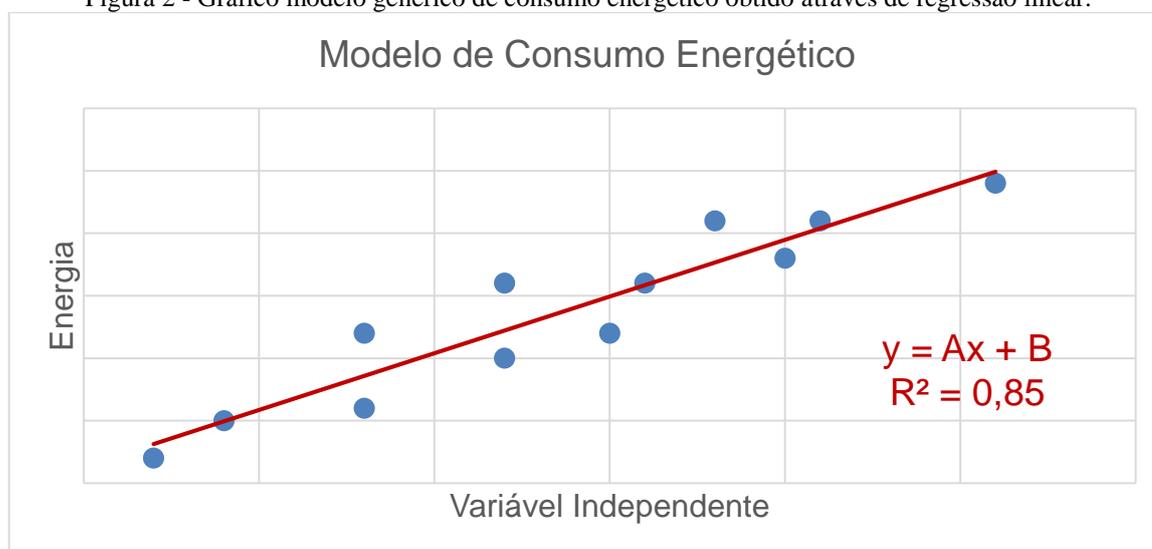
#### **Período da Linha de Base**

O Período da Linha de Base é o primeiro período de medição e seu objetivo é obter boas medições do consumo, demanda e variáveis independentes. Devem compreender as mais diversas condições de operação da instalação para produzir um bom o modelo de consumo de energia.

### Modelo de Consumo Energético:

O modelo de consumo da linha de base é uma relação matemática que relaciona a energia com as variáveis independentes. Sua complexidade depende das características de consumo da planta estudada e da precisão mínima desejada para o modelo. A complexidade dos modelos de regressão utilizados pode ser desde os simples modelos lineares, obtidos facilmente pelo cálculo do método dos mínimos quadrados e largamente utilizados, para distribuição normal dos dados, até modelos não-lineares como os Modelos Lineares Generalizados para normais que demandam técnicas estatísticas mais sofisticadas. O modelo é deduzido empiricamente, com base nas medições realizadas no período de linha de base – a engenharia ajuda apenas a encontrar as variáveis corretas. Há alguns critérios estatísticos para verificar se o modelo está adequado. A Figura 2 demonstra um modelo genérico obtido através de regressão linear, bem como o coeficiente de correlação ( $R^2$ ), indicador que varia de 0 a 1 e descreve quão bem um modelo descreve os dados, sendo 1 completamente concordante e 0 completamente discordante.

Figura 2 - Gráfico modelo genérico de consumo energético obtido através de regressão linear.



Fonte: elaborado pelo autor.

### Período de Determinação da Economia:

Depois da implementação da AEE, temos o Período de Determinação da Economia, período que medirá as mesmas variáveis do Período da Linha de Base, assim as variáveis independentes são introduzidas no Modelo de Consumo Energético para obter a Linha de Base Ajustada. Dependendo da situação, podemos medir a economia por toda a vida útil do equipamento, durante todo o contrato de desempenho, ou somente durante um período acordado, que deve poder estimar com segurança a energia economizada. O PIMVP recomenda, que assim como o Período da Linha de Base, o Período de Determinação da Economia também englobe pelo menos um ciclo de funcionamento da instalação.

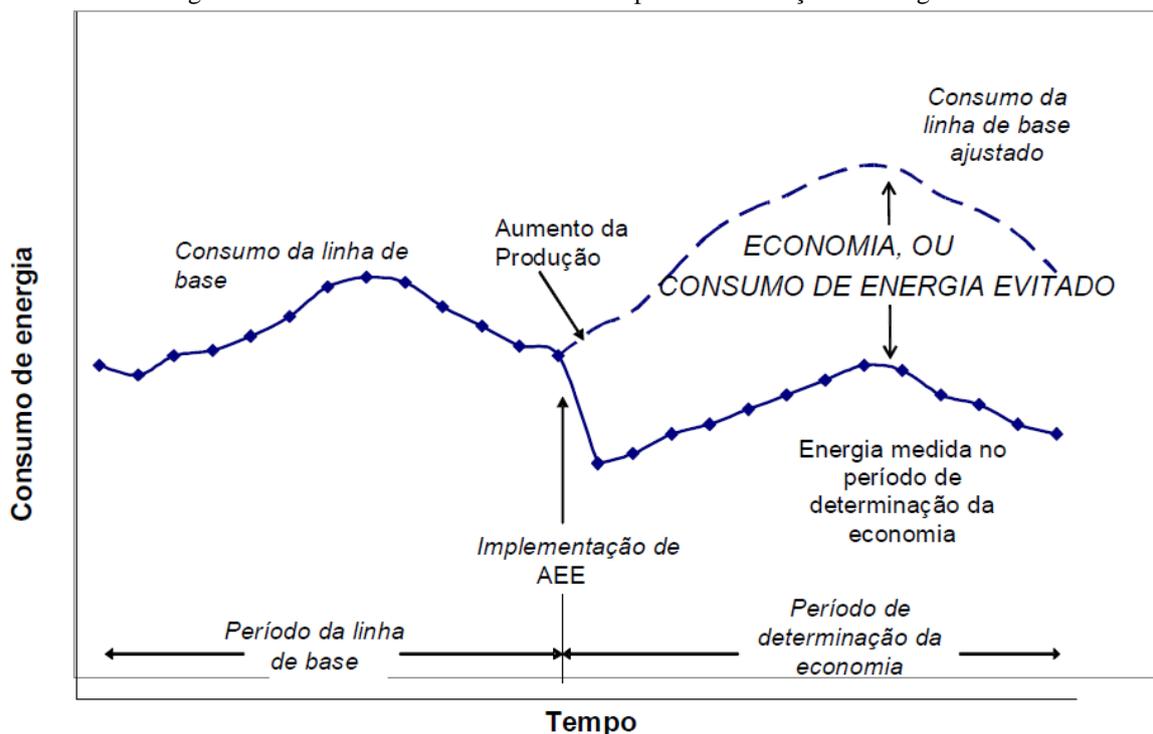
### Linha de Base Ajustada:

Trata-se uma curva de consumo de energia sintética, criada a partir da resposta do Modelo de Consumo Energético ao inserir as variáveis independentes medidas no Período de Determinação da Economia. Essa curva descreve o consumo de energia após a AEE caso a mesma não houvesse sido implementada.

### Economia

A economia de energia após a AEE será a diferença entre o consumo fornecido pela Linha de Base Ajustada e o consumo que foi efetivamente medido, ambos obtidos no Período de Determinação da Economia. Os fatores estáticos deverão ser acompanhados para ajustar a Linha de Base, se necessário. A Figura 3, apresenta um exemplo da cronologia para a determinação da economia proveniente de uma AEE, elucidando os conceitos vistos.

Figura 3 - Gráfico de histórico de consumo para determinação de energia economizada.



Fonte: EVO, 2012.

#### Fronteira de Medição:

A economia de energia pode ser determinada para toda a instalação ou em uma parte dela, como um setor ou equipamento. A fronteira de medição delimita os fluxos de energia que estão sendo medidos, tanto na “entrada” (energia consumida), quanto na “saída” (variáveis independentes). Não é uma fronteira geográfica, mas sim de controle e depende de onde se quer medir a economia. Como exemplo, em um compressor a Fronteira de Medição pode ser delimitada na entrada por um medidor de energia no quadro elétrico e na saída por um medidor de vazão e pressão.

#### Efeitos Interativos:

Um efeito interativo é uma consequência secundária trazida pela AEE fora da Fronteira de Medição. Um exemplo de Efeito Interativo em um compressor com controle de velocidade variável é o menor calor desprendido pelo motor e compressor e menores perdas nos circuitos a montante do motor do compressor.

#### Opções do PIMVP:

O engenheiro de eficiência energética deve escolher pela estratégia de medição e verificação mais adequada para o projeto em questão, que pode envolver basicamente quatro opções, como segue na Tabela 2. Nas opções A e B faz-se medições isoladas no sistema em estudo, onde a Opção A pressupõe a estimativa (e não medição) de alguns parâmetros como energia ou variáveis independentes. Na Opção B, medem-se todos os parâmetros envolvidos, tanto energia como variáveis independentes. Na Opção C, considera-se a medição de toda a instalação quando há dados disponíveis de ambos os períodos. Já a opção D também considera a medição de toda a instalação, no entanto, não há dados da linha de base e se faz necessário simular o consumo desse período, normalmente essa opção é utilizada em novas instalações.

Tabela 2 – Opções de medição do PIMVP.

	Opção PIMVP	Determinação da Economia	Exemplo
MEDIÇÃO ISOLADA	A	Medição e estimativa	Reforma de sistema de iluminação
	B	Medição Total	Instalação de Inversores de frequência em motores
TODA INSTALAÇÃO	C	Dados de ambos períodos de medição disponíveis	Programas de EE multifacetados
	D	Faltam dados do período de medição	Programas de EE multifacetados onde não há dados disponíveis para determinação de uma linha de base

Fonte: Adaptado de EVO, 2012.

O PIMVP não fornece métodos específicos para a avaliação da economia de energia de uma AEE. Ao contrário, devido à abrangência a respeito das variadas situações que podem ser encontradas na prática, define uma estrutura central de abordagem e uma terminologia que permitem a sua adaptação às diversas situações encontradas. Para cada situação específica, portanto, deve ser elaborado um Plano de M&V para nortear as ações e garantir que todos os dados necessários para a determinação da economia estarão disponíveis após a implementação da AEE, e dentro de um orçamento aceitável (EVO, 2012).

#### ▪ PROPEE e o Guia de M&V

A ANEEL vem buscando aumentar a credibilidade dos resultados dos projetos do PEE por meio da exigência de práticas de M&V consistentes. Apesar de ser reconhecido internacionalmente, o PIMVP aborda a medição e verificação dos resultados de projetos de eficiência energética de maneira abrangente. Dessa forma, após a aprovação da Resolução Normativa nº 300, de 12 de fevereiro de 2008, a Associação Brasileira das Distribuidoras de Energia Elétrica (ABRADEE) se comprometeu com o desenvolvimento dos Procedimentos do Programa de Eficiência Energética – PROPEE, uma proposta para definir procedimentos detalhados por uso final para a M&V do PEE. Ficou acordado após aprovação da ANEEL, que passará a ser obrigatório para a execução de futuros projetos financiados pelo PEE.

Após a execução do projeto, o principal resultado do trabalho consistiu na definição de metodologias de M&V por uso final, com as respectivas justificativas, levando em conta o erro, os custos envolvidos na medição, custo total do projeto e da energia economizada, para cada um dos seguintes usos finais:

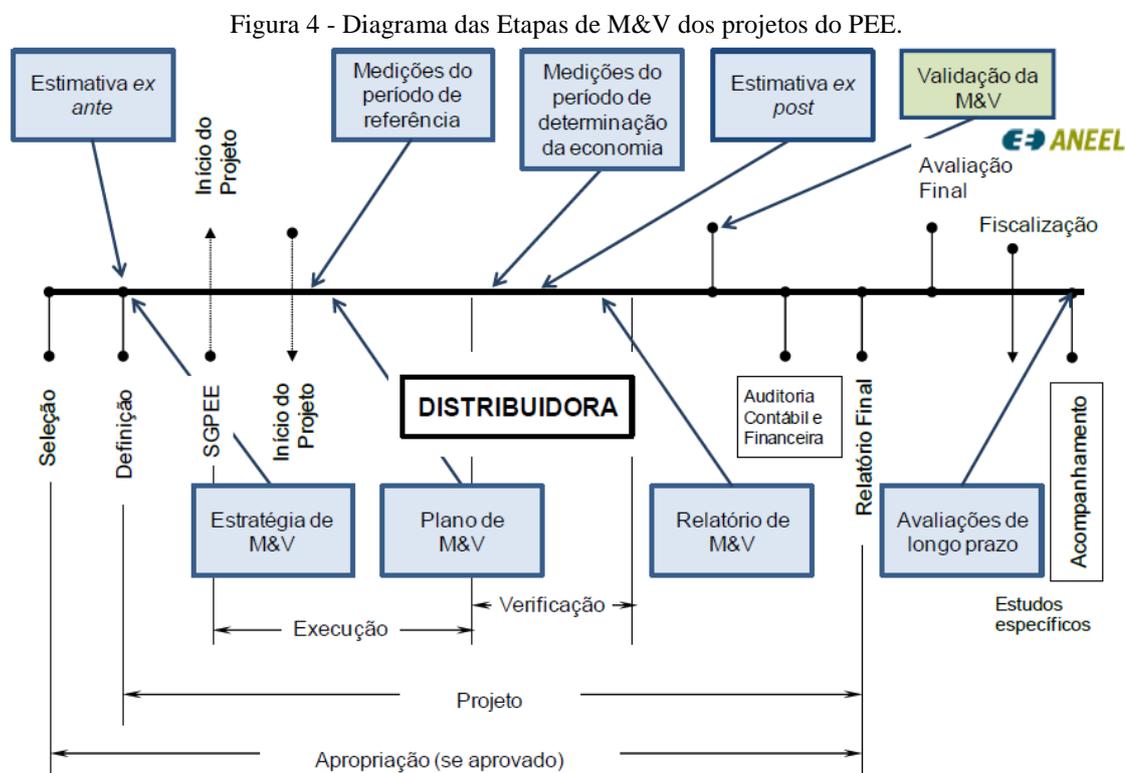
- I. Baixo Poder Aquisitivo
  - a. Iluminação
  - b. Aquecimento Solar
  - c. Refrigeração
  - d. Adequação das Instalações
- II. Iluminação
- III. Aquecimento Solar
- IV. Refrigeração
- V. Climatização
- VI. Força Motriz
- VII. Acionamento de Motores
- VIII. Ar Comprimido
- IX. Cogeração a partir de Resíduos
- X. Cogeração a partir de Combustíveis Adquiridos

O PROPEE, aprovado pela Resolução Normativa nº 556, de 02 de julho de 2013, apresenta em seu Módulo 8, dedicado exclusivamente a estabelecer as diretrizes para as atividades de Medição e Verificação que devem ser empregadas em todos os projetos do PEE, para avaliação dos resultados energéticos. Visando detalhar, padronizar e facilitar a aplicação das metodologias de M&V por uso final definidas no projeto desenvolvido pela ABRADDEE, foi elaborado o Guia de M&V.

O Guia de M&V é constituído de um documento texto base e planilhas contendo todos os cálculos necessários para a execução do processo de M&V, além de documentos complementares: Plano de M&V (de acordo com o capítulo 5 do PIMVP), Relatório de M&V (capítulo 6 do PIMVP) e formulário para coleta de dados no campo.

Em resumo, o documento base é o PIMVP; o PROPEE, em seu Módulo 8, faz a adequação dos procedimentos ao PEE, e o Guia de M&V com um nível maior de detalhamento dos procedimentos recomendados para as ações padrão, mais comuns, do PEE, quais sejam: iluminação, refrigeração e aquecimento d'água em baixa renda, iluminação, sistemas motrizes, aquecimento solar de água, ar condicionado e ar comprimido (Guia de M&V).

As etapas de M&V existentes em um projeto do PEE são mostradas na Figura 4.



Fonte: Módulo 8 - PROPEE, 2013.

### **Estimativa ex ante**

É o estudo de engenharia feito na fase de diagnóstico energético que visa estimar energia e custos do período da linha de base e do período de determinação da economia, assim como a economia a ser obtida.

### **Estratégia de M&V**

É a definição do que se vai medir e de que forma, nessa etapa é definida as variáveis independentes, fronteira de medição, opção do PIMVP, modelo do consumo da linha de base e o cálculo das economias. Serve para estimar os custos da M&V, que devem ser incorporados ao projeto.

### **Medições do período de linha de base**

Definida a ação de eficiência energética, a primeira tarefa é instalar os medidores e realizar as medições da linha de base, realizadas antes da implementação da AEE. Conseguindo um bom modelo da linha de base, pode-se elaborar um plano de M&V, descrevendo como se fará o cálculo da economia de energia.

### **Plano de M&V**

O plano de M&V antecede a implantação da AEE e deve conter as medições da linha de base, o modelo de consumo energético e todos os passos necessários para o cálculo da economia. Uma vez implantada a AEE, deve-se realizar uma verificação operacional, que consiste em avaliar se o sistema funciona adequadamente após a implementação da AEE.

### **Medições do Período de Determinação da Economia**

Após a verificação operacional da AEE, são realizadas as medições do período de determinação da economia de acordo com o Plano de M&V.

### **Estimativa *ex post***

É a estimativa de energia e custos economizados com base nas medições efetuadas no período de determinação da economia, calculadas de acordo com o plano de M&V.

### **Relatório de M&V**

Os cálculos da economia e rentabilidade da AEE compõem o Relatório de M&V, que deve ser entregue à ANEEL juntamente com o Plano de M&V.

### **Validação da M&V**

A validação dos critérios adotados pela distribuidora para M&V dos projetos ficará a cargo da ANEEL, que poderá designar um agente credenciado para realiza-la. Será avaliada a adequação de procedimentos às determinações do PROPEE e do PIMVP.

### **Avaliações de longo prazo**

As avaliações de longo prazo, que no caso de contratos de desempenho energético podem ser feitas ao longo do contrato em vários períodos de determinação da economia, no caso dos projetos do PEE serão feitas por estudos específicos que serão definidos pela ANEEL.

## **2.2 Sistemas de Ar Comprimido**

### **▪ Ar Comprimido**

A produção de ar comprimido é, basicamente, um processo de conversão de energia, no qual a energia elétrica é convertida pelo motor em energia mecânica, que aciona o compressor, e este converte em energia potencial em forma de pressão pela compressão termodinâmica do ar atmosférico (MONTEIRO, 2005). O ar comprimido é empregado em praticamente todos os setores da indústria e encontra aplicações em diversas tarefas. Por essa razão os equipamentos que produzem, distribuem e utilizam ar comprimido são essenciais. Em muitos casos, o ar comprimido representa uma parcela significativa na composição do consumo da energia elétrica da empresa. Além disso, estudos apontam os sistemas de ar comprimido como uma utilidade onde ocorrem consideráveis perdas de energia, ou seja, possuem grande potencial de economia e devem ser foco de ações de eficiência (SANTOS, A.H.M. *et al*, 2006).

Ar comprimido é uma forma de energia na qual o ar atmosférico é mecanicamente pressurizado e assim se torna apto a realizar trabalho. Os processos termodinâmicos reais, como a compressão de um gás por uma máquina, por exemplo, não são processos isotérmicos (sem variação de temperatura) nem adiabáticos (sem troca de calor), mas sim processos intermediários entre esses dois extremos, chamado de processo politrópico e obedece a seguinte relação:

$$p V^n = constante \quad (1)$$

Onde  $p$  é a pressão absoluta (Pa),  $V$  é o volume ( $m^3$ ) e  $n$  o expoente politrópico que varia entre 1 (isotérmico) e  $k$  (adiabático), onde  $k$  é a relação entre os calores específicos a pressão e volume constante, respectivamente. Já a potência de compressão politrópica de um volume de controle, de acordo com SANTOS (2006) e CAGI (2016) é dada por:

$$P_{comp} = Z R T_1 \dot{m} \left( \frac{n}{n-1} \right) E \left[ \left( \sqrt[E]{\frac{p_2}{p_1}} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right] \quad (2)$$

Onde  $Z$  é o fator de compressibilidade do gás,  $R$  é a constante do gás (kJ/kg.K),  $T_1$  a temperatura do ar de admissão (K),  $\dot{m}$  a vazão mássica de ar (kg/s),  $p_1$  e  $p_2$  são as pressões do ar na entrada e na saída do sistema, respectivamente e  $E$  é número de estágios do compressor, sendo igual a 1 para um único estágio. Apesar de apresentar a potência teórica, ou seja, sem as perdas do sistema, a equação mostrada serve de guia para a modelagem dos ganhos obtidos com ações de eficiência energética.

#### ▪ Aplicações

Nas indústrias, o ar comprimido é muito empregado nas máquinas operatrizes, em motores pneumáticos, equipamentos de movimentação e transporte de materiais, ferramentas manuais, em sistemas de comando, controle, regulagem, instrumentação e na automação de processos. Segundo SANTOS, A.H.M. *et al* (2006) quanto aos usos o ar comprimido pode ser classificado em:

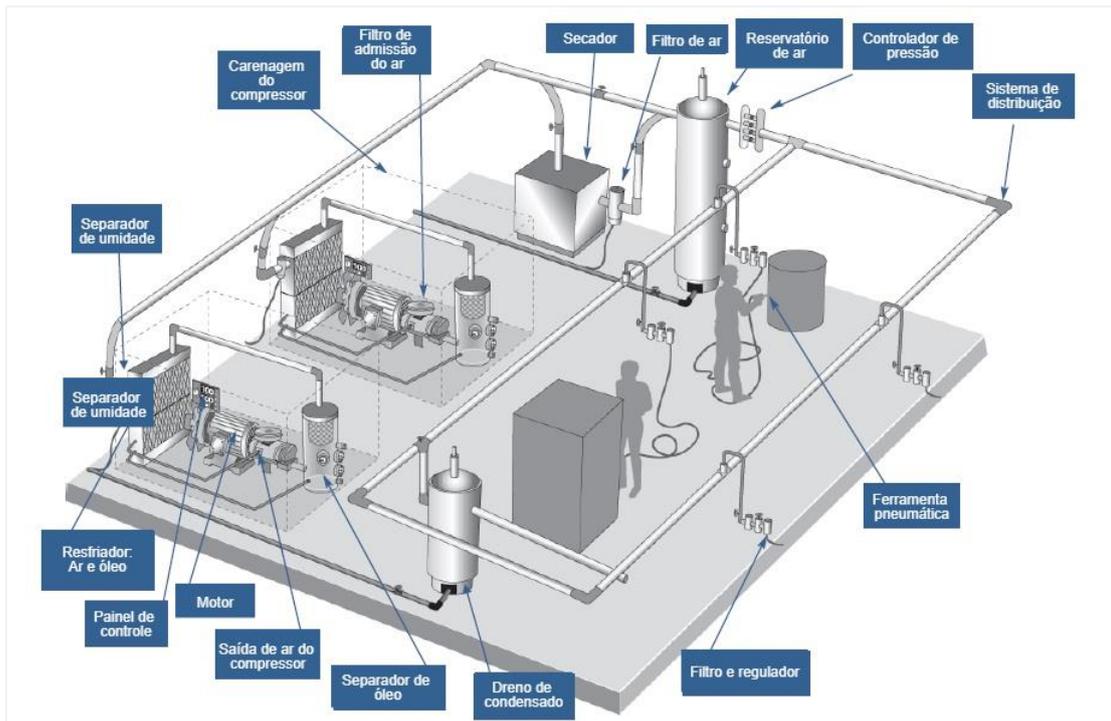
- a) Equipamentos a pressão de ar – para encher pneus e câmaras, acionar embreagens e freios, tem usos no transporte pneumático, comandos à distância, etc.
- b) Equipamentos de jato livre – são os resfriadores e aquecedores, ejetores e aspiradores, veículos a colchão de ar, transporte de pós, jateamento, pulverização, bicos de limpeza, sistemas *air-lift*, entre outros.
- c) Equipamentos de percussão – martelotes, prensas das forjarias, perfuratrizes de rocha, bate-estacas, vibradores, etc.
- d) Motores a ar comprimido – de pistões, de palhetas, de engrenagens, etc.
- e) Máquinas ferramentas fixas e portáteis - empregadas em linhas de produção e oficinas.
- f) Automação de operações industriais – sensores, atuadores, controles e processos.

#### ▪ Funcionamento e Operação

O ar atmosférico é admitido pelo compressor de ar, que apesar de passar por um filtro primário na admissão, contém várias impurezas como vapor de água e particulados. O ar então é comprimido pelo compressor, e nesse processo pode ser contaminado com o óleo lubrificante do compressor. Na compressão há uma considerável elevação da temperatura do ar, dependendo do tipo de compressor pode chegar de 80°C a 180 °C. Da saída do compressor, o ar entra no separador de óleo, e em seguida, passa por um trocador de calor para seu resfriamento, que pode ser do tipo resfriado por água ou resfriado por ventilação forçada de ar. Esse resfriamento reduz a temperatura do ar comprimido proveniente da descarga do compressor para valores entre 10°C até 15°C acima da temperatura do ambiente, facilitando a precipitação de condensado. Seguindo sua rota, o fluxo de ar vai para o reservatório, também chamado de pulmão, onde é armazenado.

No reservatório se precipita grande parte da umidade contida no ar comprimido. Visando remover a máxima quantidade de umidade do ar, este ainda passa pelo equipamento secador, onde é precipitado o restante do condensado que se quer retirar. Nessa etapa, o ar está industrialmente seco e resfriado e vai passar pela filtragem final, para que sejam eliminadas as impurezas restantes antes que o ar seja fornecido à rede de distribuição. O sistema de distribuição do ar, formado por dutos, conduzirá o ar até sua aplicação específica. Nela ainda poderão estar instalados purgadores, válvulas, filtros e reguladores de pressão (ROCHA, 2005). A Figura 5 apresenta a visão tridimensional de uma instalação de ar comprimido.

Figura 5 - Visão tridimensional de uma instalação de ar comprimido.



Fonte: adaptado de US DOE, 2016.

### 2.3 Eficiência energética em sistemas de ar comprimido

A seguir são mostradas as principais ações de eficiência energética aplicadas a plantas de ar comprimido existentes, com exceção da redução de perda de carga e da recuperação de calor da compressão.

#### a. Eliminar usos não apropriados

Uma vez que a produção de ar comprimido é sujeita a um alto consumo de energia, eliminar usos não apropriados, ou seja, realizar a mesma tarefa através de uma fonte mais eficiente, é uma medida muitas vezes negligenciada numa planta industrial. A Tabela 3 apresenta uma lista de tarefas potencialmente inapropriadas e suas respectivas sugestões alternativas de consumo mais eficiente.

Tabela 3 - Usos não apropriados de ar comprimido e sugestões de alternativas.

Potencial uso não apropriado	Sugestão de alternativas/ações
Limpeza, Secagem, Arrefecimento	Soprador baixa pressão, ventiladores elétricos, vassouras
Aspersão	Soprador baixa pressão e misturadores
Aspiração, Atomização	Soprador baixa pressão
Enchimento	Soprador baixa-média pressão
Gerador de vácuo	Bomba vácuo dedicada ou sistema central de vácuo
Condicionamento interior	Ventilador elétrico
Refrigeradores vortex sem termostatos	Ar condicionado, adição de termostato ao refrigerador
Misturador (Motor ar comprimido)	Misturador a motor elétrico
Bombas de diafragma à ar comprimido	Regulador e controle de velocidade; bomba elétrica
Equipamento ocioso	Adicionar válvula de ar na admissão
Equipamento abandonado	Desconectar suprimento de ar do equipamento

Fonte: Adaptado de US DOE, 2004.

*b. Redução dos vazamentos*

Vazamentos nas plantas de ar comprimido são comuns e podem representar uma significativa perda de energia, em alguns casos de 20 a 30 por cento. Um plano de manutenção eficaz, com caça periódica aos vazamentos deve manter as perdas por vazamento entre 5 a 10 por cento (US DOE, 2016). Frequentemente os vazamentos se encontram nas junções da linha de ar comprimido, mangueiras pneumáticas e equipamentos de uso final. Para localizar os vazamentos, usa-se técnicas com aparelhos de ultrassom ou simples aplicações de espumas sobre os dutos de ar. Existem diferentes formas para determinar o percentual de vazamento em uma planta de ar comprimido, para compressores com controle de liga/desliga ou carga/alívio pode-se utilizar um método simples e prático para estimar esses vazamentos. O cálculo se utiliza apenas de medidas dos tempos de carga/alívio ou liga/desliga e necessita que não haja demanda de ar comprimido na planta (todos os equipamentos da rede de ar desligados). Um número de medidas adequado deve ser realizado para que seja determinado o tempo médio que o compressor fica ligado e desligado ou em carga e alívio. O compressor entrará em carga e após em alívio, e assim sucessivamente o ciclo segue, alimentando as perdas por vazamento na instalação. De acordo com US DOE (2016), o percentual de ganho  $G1$  ao reduzir os vazamentos pode ser calculado por:

$$G1 = \left( \frac{Tc_1}{Tc_1 + Ta_1} - \frac{Tc_2}{Tc_2 + Ta_2} \right) \cdot 100\% \quad (3)$$

onde  $Tc_1$  e  $Ta_1$  são os tempos em carga/ligado e alívio medidos antes do reparo, respectivamente. E  $Tc_2$  e  $Ta_2$  são os tempos em carga/ligado e alívio medidos após o reparo, respectivamente.

*c. Temperatura de admissão do ar*

Quanto menor for a temperatura do ar na aspiração de um compressor, menor será a energia necessária para sua compressão, uma vez que a temperatura está inversamente relacionada com a massa específica e conseqüentemente com a vazão de ar. Ao admitir ar frio, maior massa de ar poderá ocupar o mesmo volume do que quando ele está mais aquecido, assim menos potência será necessária para a compressão. Portanto, é importante evitar que os compressores aspirem ar no interior do recinto onde estão instalados, cuja temperatura é geralmente mais elevada que a do ar atmosférico externo. Nesse sentido, podem-se providenciar tubulações ligando a aspiração de ar do compressor a uma tomada de ar do exterior à sala de máquinas (MONTEIRO, 2005).

Para as temperaturas normalmente encontradas em ar ambiente, onde a diferença entre o ar externo e interno não ultrapassa os 50°C, pode-se aproximar a variação entre a potência de compressão e a temperatura de admissão como uma relação linear. De acordo com SANTOS (2006), o benefício percentual  $G2$  no consumo de energia em um sistema de ar comprimido devido à variação na temperatura de admissão do ar é dado por:

$$G2 = \left( 1 - \left( \frac{T_1}{T'_1} \right) \right) \cdot 100\% \quad (4)$$

onde  $T_1$  é a temperatura do ar de admissão antes da melhoria e  $T'_1$  é a temperatura do ar de admissão após a melhoria. Para esse cálculo todas as outras variáveis devem permanecer inalteradas e as temperaturas devem ser expressas em Kelvin.

*d. Relação de pressão*

A pressão de trabalho também é um fator importante, pois está diretamente relacionada com o consumo de energia. Quanto menor a pressão de trabalho, menor será a relação de pressão, e conseqüentemente menor a potência de compressão necessária. Por essa razão é de suma importância operar na pressão adequada aos equipamentos e controlar rigorosamente as perdas de carga do sistema. A pressão de trabalho da instalação é determinada pela menor pressão que supere as perdas de carga do sistema e ainda assim entregue a pressão e vazão solicitada pelos equipamentos no ponto de uso. Em alguns casos com solicitações de valores de pressão diferentes, torna-se vantajoso economicamente a utilização de linhas

de ar comprimido com diferentes níveis de pressão atendidos por diferentes compressores. O benefício percentual da redução de relação de pressão  $G3$  é dado por:

$$G3 = \frac{\left( \sqrt[n]{\frac{E(p_2' + P_{atm})}{(p_1 + P_{atm})}} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1}{\left( \sqrt[n]{\frac{E(p_2 + P_{atm})}{(p_1 + P_{atm})}} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1} \cdot 100\% \quad (5)$$

onde  $p_1$  e  $p_2$  são as pressões de admissão e descarga do compressor antes da redução da relação de pressão, respectivamente. E  $p_1'$  e  $p_2'$  são as pressões de admissão e descarga do compressor após a redução da relação de pressão, respectivamente. E  $P_{atm}$  é a pressão atmosférica.

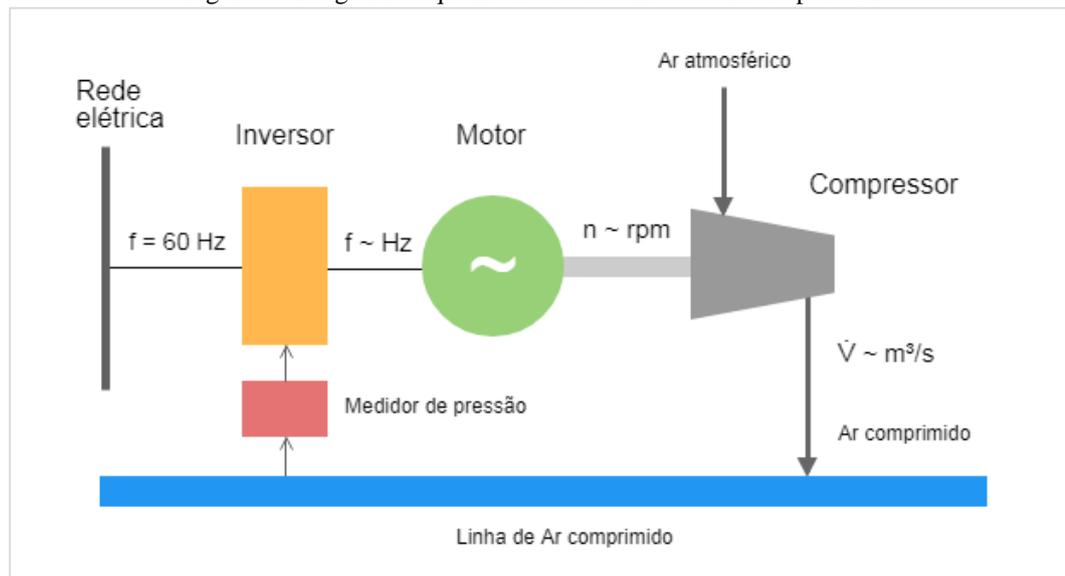
*e. Melhoria no sistema de controle*

O controle de pressão dos sistemas de ar comprimido permite manter a pressão de trabalho da linha de distribuição dentro de uma faixa de operação aceitável, em torno da pressão nominal, com as diferentes solicitações de vazão. O controle aciona o compressor através do motor conforme a demanda da linha, ou seja, com um maior consumo de ar comprimido na linha a pressão tende a cair com mais frequência, fazendo o compressor ser acionado mais vezes. No entanto, a eficiência desses modos de controle varia muito, dependendo da tecnologia empregada e do perfil de demanda de ar da instalação. Portanto, deve ser realizada uma seleção cuidadosa para reduzir custos com energia. Ao longo dos anos, os fabricantes de compressores desenvolveram vários tipos diferentes de estratégias de controle.

Os sistemas de controle mais antigos utilizam o controle de pressão através de válvulas de alívio de pressão, que desviam o excesso de pressão para a atmosfera, ou *dampers* (válvulas mecânicas de estrangulamento da vazão) na admissão do ar para obstruir a aspiração. Posteriormente foram desenvolvidos sistemas que se baseiam em partida/parada do compressor, com auxílio de pressostatos, desligam o compressor quando a pressão ultrapassa o limite superior da faixa de operação, e é religado quando a pressão cai abaixo do limite inferior. E numa outra versão chamada de carga/alívio, não existe a fase de desligamento, o sistema de controle mantém o compressor em funcionamento, porém sem executar trabalho de compressão (em vazio), consumindo em média de 20 a 60% da potência nominal do motor.

Os controles mais modernos permitem o controle contínuo do motor que aciona o compressor, e dessa forma acompanhando com maior rapidez as variações de pressão do sistema, com destaque para o controle através de inversor de frequências, também chamado de controle de velocidade variável (VSD, do inglês *Variable Speed Drive*). Nessa aplicação o inversor de frequências é instalado entre a rede elétrica e o motor. A frequência elétrica do motor está diretamente relacionada com a velocidade de rotação, e esta por sua vez diretamente relacionada com a vazão de ar do compressor. O inversor de frequências é programado de forma a modular a frequência elétrica na entrada do motor a partir de sinais recebidos por um medidor de pressão na linha de ar comprimido. Esse controle continuamente se ajusta de modo a fornecer a vazão de ar comprimido necessária, e além da eficiência através da redução da vazão, o VSD também proporciona uma redução relativa à diminuição da pressão, uma vez que a tecnologia mantém a pressão da linha em uma faixa mais estreita e estável em comparação com o perfil de pressão “dente de serra” visto em outras tecnologias como o controle por carga e alívio. Comumente esse controle apresenta reduções significativas no consumo de energia elétrica, de 5 a 35% (DINDORF, 2011; BENEDETTI, M *et al*, 2018), dependendo do perfil de demanda. Um diagrama esquemático desse controle pode ser visto na Figura 6, a seguir.

Figura 6 - Diagrama esquemático do sistema de controle por VSD.



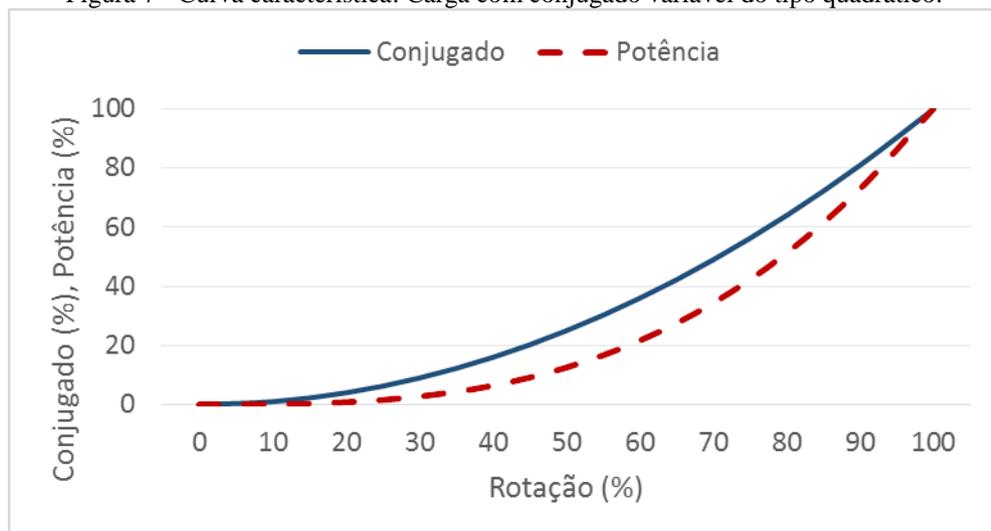
Fonte: Elaborado pelo autor.

A correta modelagem e verificação da economia de um sistema de controle com velocidade variável depende do conhecimento do comportamento da carga, ou seja, do conjugado na ponta do eixo do motor solicitado pela carga para diferentes velocidades de rotação. De acordo com BHASE (2015), as cargas são classificadas de maneira geral em três grupos: conjugado variável, conjugado constante e potência constante.

### 1. Carga com conjugado variável

As aplicações como ventiladores, bombas centrífugas, compressores centrífugos e exaustores, possuem uma característica de conjugado variável com a rotação. Em muitos exemplos essa variação é de forma linear ou quadrática em relação à rotação, mas há exceções. Essa característica de carga permite as maiores possibilidades de economia. A Figura 7 exibe a curva característica de carga com conjugado variável do tipo quadrático.

Figura 7 - Curva característica: Carga com conjugado variável do tipo quadrático.

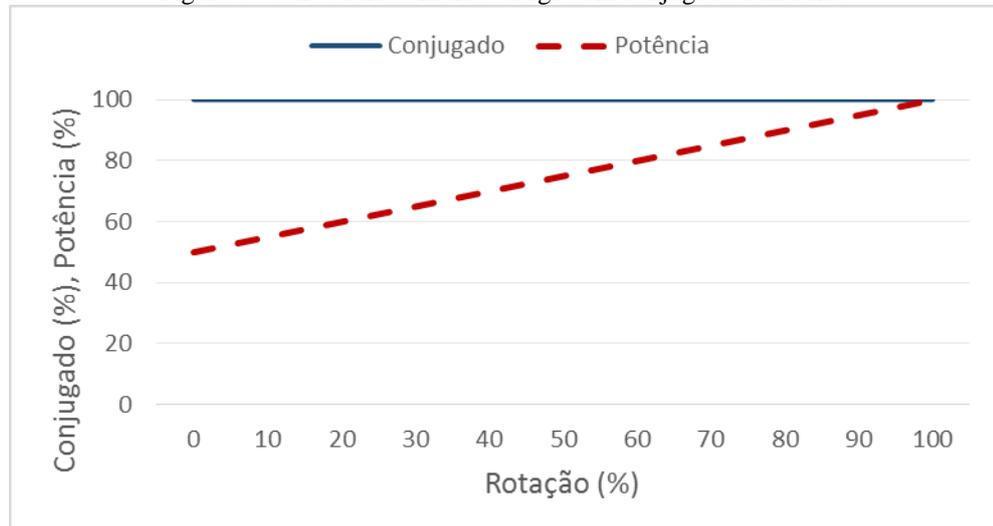


Fonte: Elaborado pelo autor.

### 2. Carga com conjugado constante

São exemplos de cargas com conjugado constante compressores alternativos e helicoidais, esteiras transportadoras, trituradores e bombas de deslocamento. Essas aplicações apresentam conjugado aproximadamente constante para todas as faixas de rotação. Nessas aplicações a economia de energia se dá de maneira linear como mostra a Figura 8:

Figura 8 - Curva característica: Carga com conjugado constante.

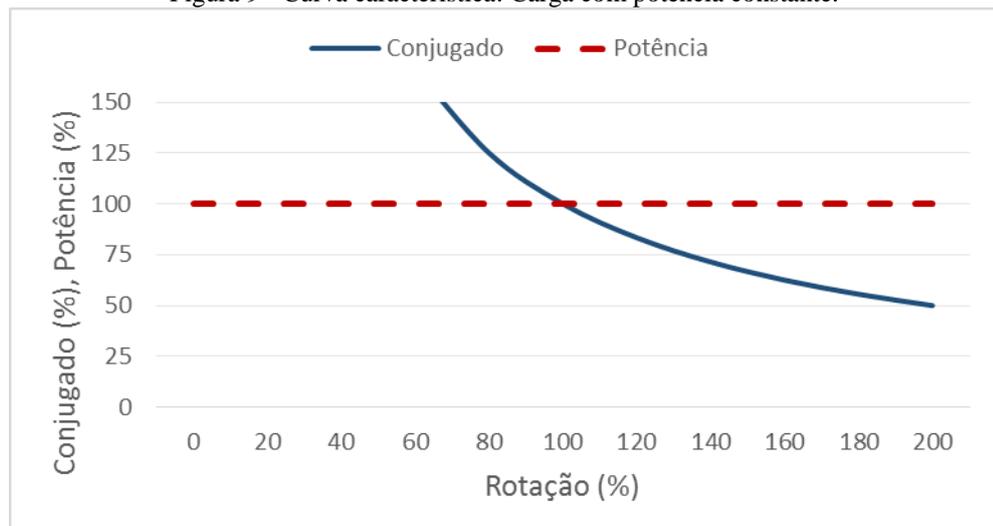


Fonte: Elaborado pelo autor.

### 3. Carga com potência constante

Máquinas como bobinadeiras e ferramentas de usinagem são exemplos de cargas com potência constante. A característica de conjugado apresenta relação inversamente proporcional à rotação uma vez que a potência se mantém constante para todas as faixas de operação. Dessa forma, essa característica de carga não apresenta potencial de economia através de controle da velocidade de rotação. As leis de afinidade desse tipo de carga são dadas conforme a Figura 9.

Figura 9 - Curva característica: Carga com potência constante.



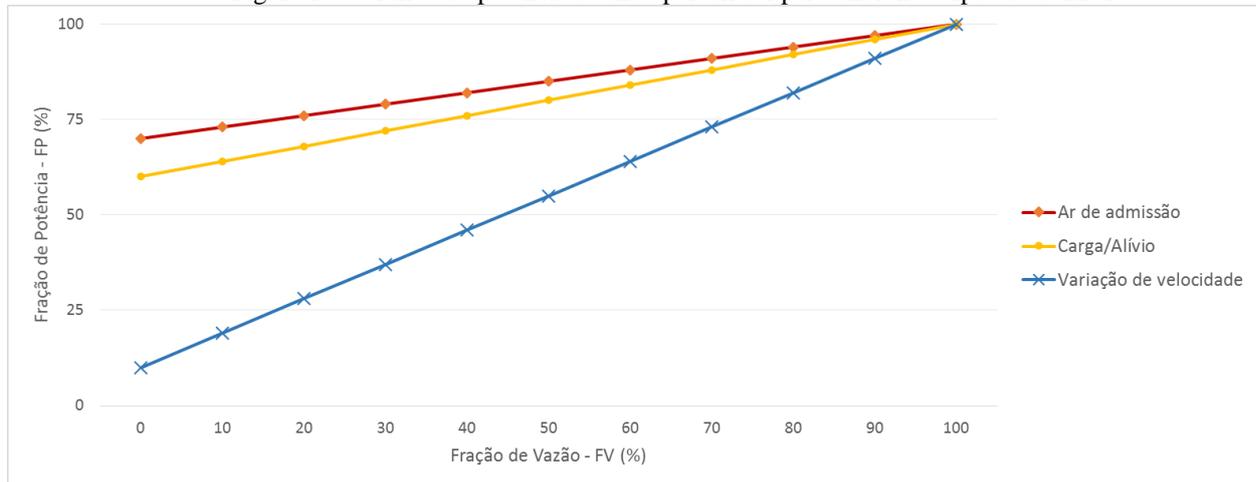
Fonte: Elaborado pelo autor.

Compressores rotativos do tipo parafuso são os mais utilizados em sistemas industriais, e possuem uma característica de carga com conjugado aproximadamente constante, ou seja, com potência proporcional

à velocidade de rotação. De acordo com Aguiar (2008) sua característica de vazão é diretamente proporcional à rotação do motor.

SCHMITH *at. al.* (2003) e SCHMITH *et al.* (2005) propõem uma modelagem que relaciona indicadores de potência e vazão de compressores do tipo parafuso para diferentes sistemas de controle, conforme Figura 10. Essa modelagem se baseia em testes de desempenho em mais de 50 sistemas de ar comprimido, dados de fabricantes e do *software Air Master+* (Washington State University, 2000).

Figura 10 - Gráfico de potência e vazão percentual para diferentes tipos de controle.



Fonte: Adaptado de SCHMITH (2003).

A relação linear proposta é dada por:

$$FP = FP0 + (1 - FP0).FV \quad (6)$$

onde  $FP$  é a fração de potência,  $FV$  é a fração de vazão e  $FP0$  é a fração da potência para vazão nula. Dado um compressor cujos valores de potência nominal, potência em vazio, vazão nominal e o tipo de controle são conhecidos, é possível obter valores intermediários e assim estimar os ganhos de eficiência com a substituição da tecnologia de controle. Segundo os autores, a estimativa se justifica tanto para estimar valores de potência com medidas de vazão, quanto vice-versa. No entanto, em muitos casos é mais fácil obter medidas elétricas que de vazão. Esse é um modelo simplificado que serve quando há apenas medições elétricas, sem considerar outros parâmetros importantes no consumo de energia de um compressor como a vazão, temperatura de admissão do ar e pressão. O benefício percentual  $G4$  com a utilização de um sistema de controle mais eficiente é dado por:

$$G4 = \left(1 - \frac{E_2}{E_1}\right) \cdot 100\% \quad (7)$$

onde  $E_1$  e  $E_2$  são as quantidades de energia consumida antes e após a substituição do sistema de controle, respectivamente.

### 3 METODOLOGIA

Os objetivos do trabalho são realizar uma revisão das principais medidas de eficiência energética em plantas de ar comprimido industriais, bem como uma revisão dos principais conceitos de M&V utilizados nos projetos do PEE. E após a revisão das medidas, elaborar um estudo de eficiência energética em uma indústria real, adequando o trabalho desenvolvido à realidade da planta industrial analisada. A metodologia utilizada na segunda parte do trabalho é mostrada na Figura 11.

Figura 11 - Diagrama Esquemático da Metodologia Empregada.



Fonte: Elaborado pelo autor

Inicialmente são apresentadas as características gerais da unidade da indústria onde foi realizado o estudo, e na sequência as características do sistema de ar comprimido escolhido. De acordo com as características particulares do sistema analisado são definidas as AEE que terão seus impactos mensurados no decorrer do estudo. Escolhida as AEE, inicia-se a medição e inspeção direcionada com a finalidade de fundamentarem as estimativas dos potenciais de eficiência energética. Com os dados das medições e inspeções se faz o estudo dos potenciais de ganhos das AEE propostas com base nas referências da Fundamentação Teórica. Ao final são realizadas análises econômicas das ações sugeridas, os ganhos financeiros e as conclusões do estudo. Caso fosse realizada alguma das AEE, o passo seguinte seria a verificação das economias, medindo novamente as mesmas variáveis e comparando os resultados com o estado anterior por meio de indicadores, como o consumo específico (kWh/m<sup>3</sup>), por exemplo.

## 4 ESTUDO DE CASO

O presente capítulo apresenta o estudo de caso de uma possível AEE em um dos compressores de ar de uma indústria metalúrgica localizada no município de Cachoeirinha – Rio Grande do Sul.

### 4.1 Características da indústria

A indústria metalúrgica objeto do estudo fabrica peças de aços especiais para outros setores da indústria, como mineração e ferroviário. Está conectada à rede elétrica da concessionária de energia RGE no nível de tensão de 23kV através de duas subestações independentes. Assim, a indústria possui duas unidades consumidoras distintas, a mais importante em termos de consumo e que engloba quase toda a planta industrial é do Grupo tarifário A, Subgrupo A4 Industrial, enquadrada na estrutura tarifária horazonal verde livre, uma vez que compra energia no mercado livre. A outra unidade consumidora está no Grupo B, Subgrupo B3 Industrial, e alimenta apenas um setor do parque fabril responsável pela usinagem e acabamento de peças. O consumo mensal médio da unidade de usinagem é de 15.301 kWh/mês, considerando os últimos 12 meses.

### 4.2 Características do compressor

O compressor escolhido para o estudo está localizado na unidade de usinagem e sozinho fornece ar comprimido para 5 retíficas pneumáticas manuais, além de 9 pistolas de ar para limpeza pessoal, de peças e da estação de trabalho. As retíficas possuem a função de dar acabamento nos orifícios de peças onde não é possível fazê-lo com as máquinas grandes de usinagem. As características do compressor da unidade de usinagem são mostradas na Tabela 4.

Tabela 4 - Características do sistema de ar comprimido escolhido.

<b>Característica</b>	<b>Dado</b>
Fabricante	SULLAIR S. A.
Modelo	12 50 LAC
Tipo de compressor	Parafuso
Estágios de compressão	1
Pressão de trabalho	7 bar
Pressão máxima	8 bar
Pressão mínima	4 bar
Capacidade de vazão	6,654 m <sup>3</sup> /min
Controle de pressão	Carga/alívio
Potência do motor	50 cv
Volume do reservatório	0,38 m <sup>3</sup>
Ano de fabricação	1979

Fonte: Manual de usuário SULLAIR, 1979.

#### 4.3 Ações de eficiência energética:

Dadas as medidas de eficiência energética apresentadas no início desse trabalho, foram avaliadas quais são aplicáveis ao sistema de ar comprimido da unidade de usinagem. Primeiramente foi observado se os usos de ar comprimido do setor poderiam ser substituídos por uma fonte mais eficiente. As pistolas de ar comprimido dificilmente seriam substituídas pois cumprem bem sua função, já possuem estrutura nas estações de trabalho e não possuem equipamento semelhante que utiliza outra fonte de energia. Já as retíficas possuem seu equivalente elétrico, no entanto, essa medida foi testada no setor por diversas vezes conforme reportado pelos funcionários, e sua versão elétrica não suporta o desgaste do uso, que acaba por inutilizar-se rapidamente. A segunda medida que trata da redução de vazamentos foi adotada, visto que o sistema estudado é antigo e possui baixa manutenção, sugerindo um potencial de perdas por vazamento. A redução da temperatura do ar de admissão ao aspirar ar externo não se aplica, visto que o compressor está instalado do lado de fora do pavilhão e já opera dessa forma. A medida de redução da pressão de trabalho do sistema também não é factível, pois, a pressão da linha já está corretamente dimensionada para a utilização das retíficas pneumáticas manuais. Por último, a utilização de um sistema de controle através de inversor de frequências possui potencial de economia frente ao sistema atual de carga e alívio.

#### 4.4 Medições

A medição dos tempos de carga e alívio do compressor para determinar o percentual de vazamentos, quando não há funcionamento da fábrica, foi obtida em cinco ciclos de funcionamento conforme procedimento descrito no item *b*) da seção 2.3, e são mostrados na Tabela 5 a seguir.

Tabela 5 - Medições de tempo de carga e alívio do compressor.

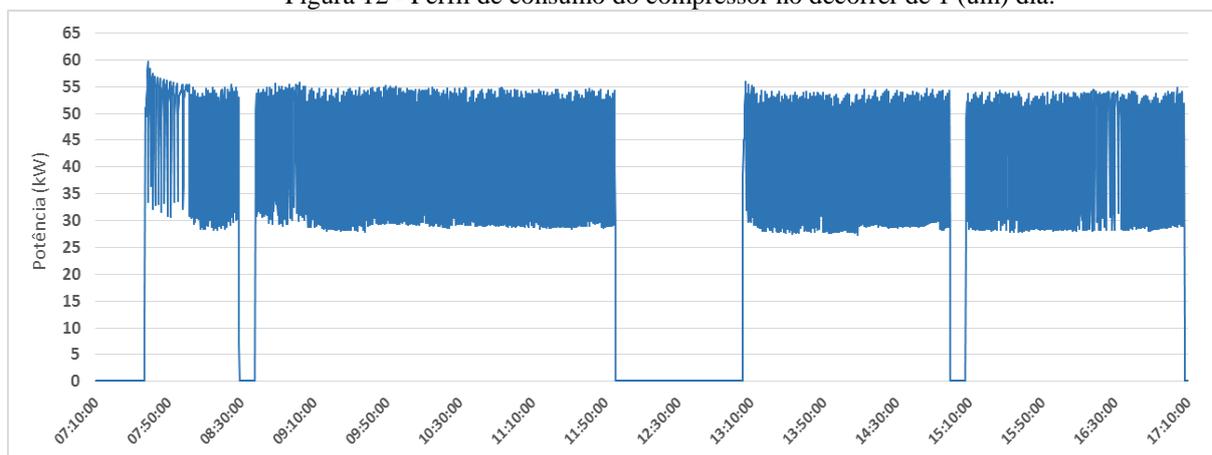
<b>Dado medido</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>Média</b>
Tempo em carga (s)	23	21,6	23,2	22,7	22,9	22,68
Tempo em alívio (s)	31,6	33,2	33	32,9	32,8	32,7

Fonte: Elaborado pelo autor.

A fronteira de medição elétrica foi limitada pelo circuito de alimentação do compressor junto ao quadro geral de distribuição do setor de usinagem, onde se instalou o analisador de energia METREL plus MI 2292. A medição elétrica foi realizada para corrente e tensão em cada uma das três fases do circuito de alimentação do compressor em duas etapas e com resolução de medições distintas. A primeira foi medida durante 11 dias e com tempo de integração dos dados de 15 minutos, de forma a obter o consumo diário no

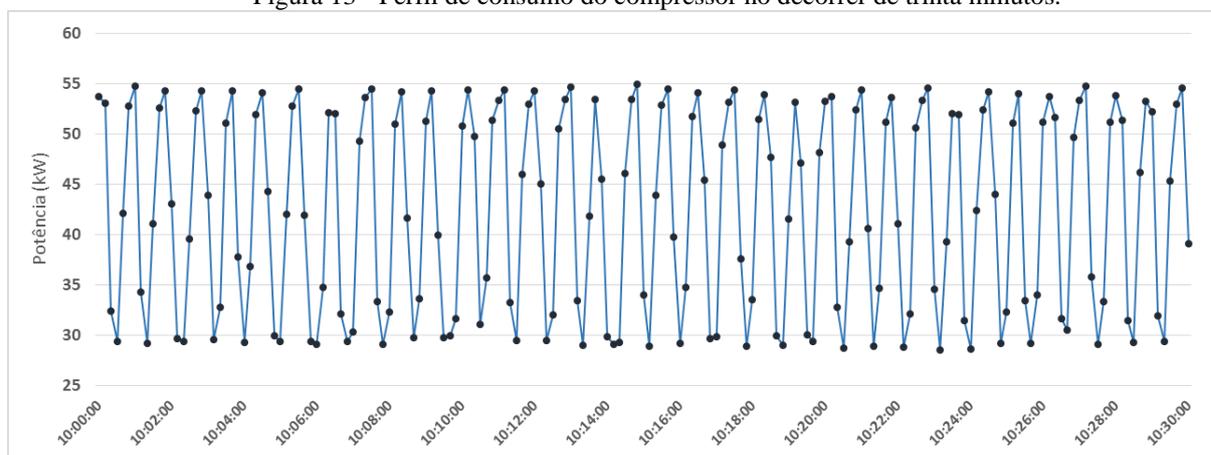
período. A segunda foi realizada durante 5 dias não consecutivos, com tempo de integração dos dados de 10 segundos. O perfil geral de consumo do compressor ao longo de um dia de operação, é mostrado na Figura 12, onde é possível visualizar o período de funcionamento da planta e os intervalos de pausa dos trabalhadores que ocorre no horário do almoço, das 12:00h às 13:00h, e em outros dois intervalos menores distribuídos nos turnos da manhã e tarde. Nota-se também as potências médias de carga e alívio de operação do compressor, sendo 52,15 kW e 32,97 kW, respectivamente. O perfil de oscilação entre carga e alívio de operação ao longo do tempo é mostrado em maior resolução em um intervalo de 30 minutos na Figura 13.

Figura 12 - Perfil de consumo do compressor no decorrer de 1 (um) dia.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 13 - Perfil de consumo do compressor no decorrer de trinta minutos.



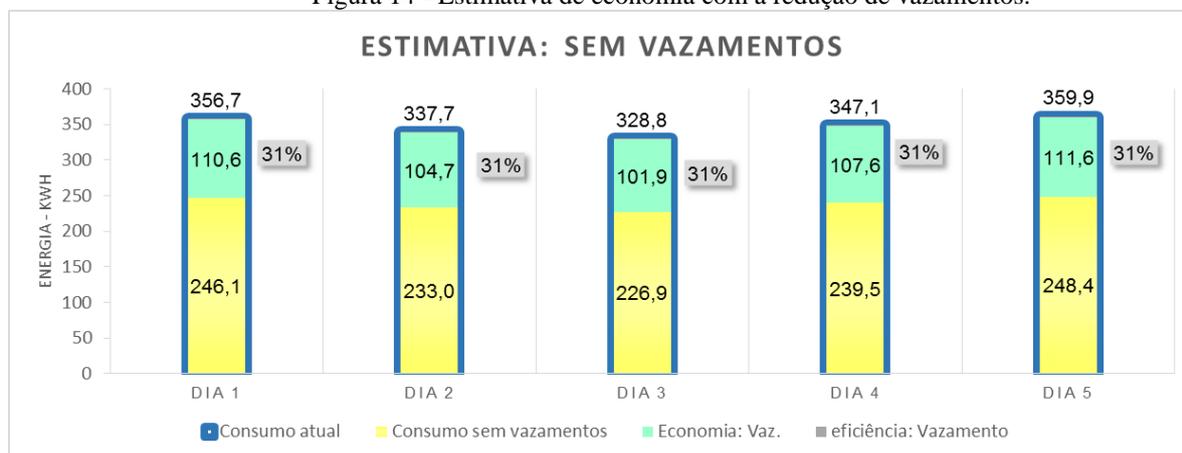
Fonte: Elaborado pelo autor.

#### 4.5 Potencial de Economia de Energia

Para estimar o potencial de economia de energia proveniente de cada AEE, foram aplicados os dados medidos nas equações correspondentes da Fundamentação Teórica. Utilizando a primeira parte da expressão (3) com os dados medidos dos tempos de carga e alívio da Tabela 5, obteve-se um percentual de perdas por vazamentos na ordem de 41%, valor relativamente alto em relação ao recomendado por (US DOE, 2016), que sugere manter as perdas por vazamento entre 5 e 10%. Caso se mantenha 10% de vazamentos após os consertos, então há um potencial de redução viável estimado de cerca de 31%. Em uma inspeção técnica realizada no local, foi constatado um escape constante de ar por um filtro do compressor substituto. O compressor substituto da unidade de usinagem está conectado na mesma tubulação de distribuição através de um duto com uma válvula do tipo globo normalmente aberta, ou seja, não há nenhum dispositivo cessando o fluxo de ar entre a tubulação de distribuição e o compressor substituto, permitindo que o escape de ar continue. Outra constatação, foi a existência de uma válvula de alívio que abre quando a pressão atinge seu limite superior, mas que não fecha na sequência, fechando apenas quando a pressão do

sistema atinge seu limite inferior. Assim, a válvula de alívio que deveria apenas não deixar a pressão ultrapassar o limite superior, está operando como um ponto de consumo, fazendo o compressor ser acionado com maior frequência e aumentando seu tempo em carga ao longo do dia, causando possivelmente um grande impacto no consumo de energia do compressor. A Figura 14 expõe a estimativa de economia com a redução de vazamentos de 31%.

Figura 14 - Estimativa de economia com a redução de vazamentos.



Para a avaliação da substituição do sistema de controle, os dados do compressor e das medições foram aplicados à equação (6), e obtiveram-se os parâmetros que descrevem a curva linear de potência do compressor parafuso para diferentes vazões com o sistema de controle de carga/alívio, conforme a seguir:

- Potência em carga: 52,15 kW
- Potência em alívio: 32,97 kW
- Vazão em carga: 399,24 m<sup>3</sup>/h
- Vazão em alívio: 0,00 m<sup>3</sup>/h
- Fração de potência para vazão nula com controle de carga e alívio (FP0): 0,632 (63,2%)
- Fração de potência para vazão nula com controle de velocidade variável (FP0): 0,1 (10%)
- Fração de potência para vazão nominal (FP): 1 (100%)

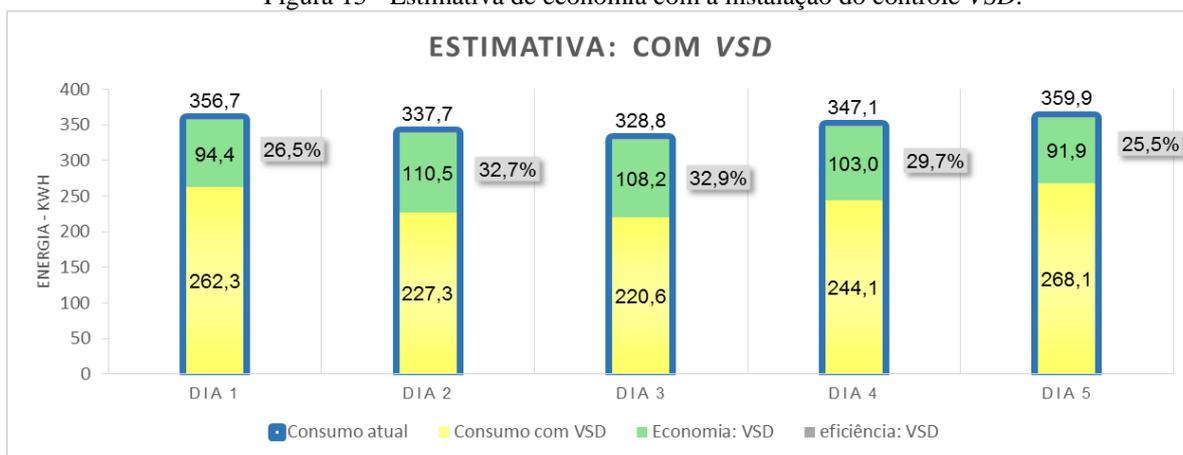
O valor da fração de potência para vazão nula com a tecnologia de controle de velocidade variável de 10%, é sugerida por SCHMIDT (2003). Através das medições do compressor foram identificados os tempos que o mesmo se encontra em carga, alívio e desligado. Assim, foi possível determinar as vazões e volumes fornecidos pelo compressor ao longo dos dias medidos. A partir do volume de ar comprimido de cada intervalo, encontra-se a potência correspondente na curva de potência para o caso de o compressor operar com controle de velocidade variável. Essa nova potência define o consumo de energia para a compressão do mesmo volume de ar no período, que por sua vez é menor em relação à tecnologia de carga e alívio. A mesma análise foi realizada em base horária com os dados medidos para validar os resultados. A Tabela 6 apresenta os resultados da análise do consumo, tempos carga, alívio e desligado, além dos volumes e vazões médias para cada um dos dias e o consumo específico. E a Figura 15 apresenta os resultados de consumo medido no compressor e as estimativas de economia obtidas com a medida de eficiência, consumo do compressor caso já estivesse operando com a nova tecnologia e eficiência correspondente para cada um dos dias.

Tabela 6 - Dados verificados: tempos de carga e alívio, volume e vazão média.

Grandeza	dia 1	dia 2	dia 3	dia 4	dia 5
Consumo (kWh)	356,7	337,7	328,8	347,1	360,0
Tempo em carga (horas)	4,69	3,96	3,84	4,31	4,81
Tempo em alívio (horas)	3,4	3,98	3,9	3,71	3,31
Tempo desligado (horas)	0,75	0,9	1,1	0,82	0,72
Volume (m <sup>3</sup> )	1.872,4	1.581,0	1.533,1	1.720,7	1.920,3
Vazão média (m <sup>3</sup> /h)	231,5	199,1	198,1	214,6	236,5
Consumo específico (kWh/m <sup>3</sup> )	0,19	0,21	0,21	0,20	0,19

Fonte: Elaborado pelo autor.

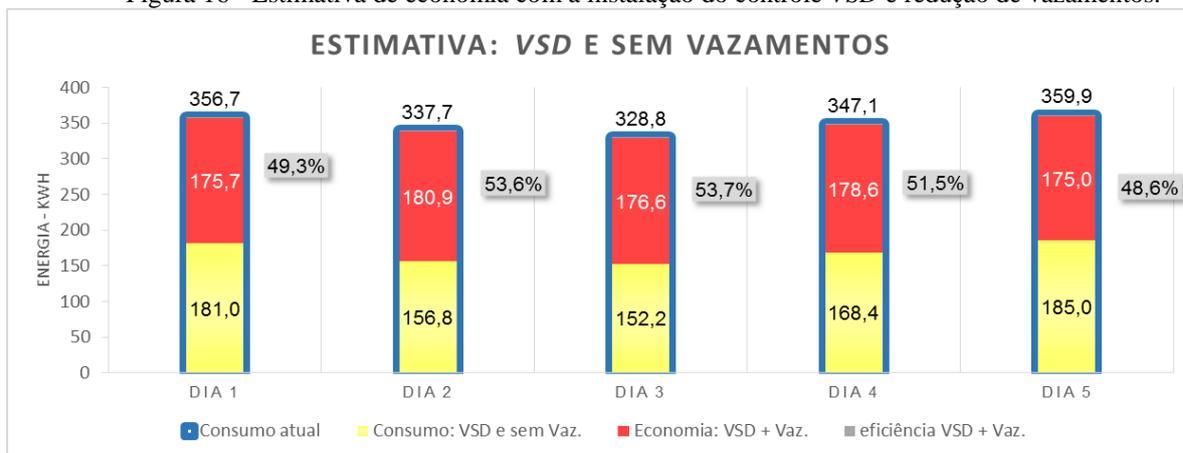
Figura 15 - Estimativa de economia com a instalação do controle VSD.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Observando os dados da Tabela 6 e da Figura 15, é possível verificar que para o modelo quanto menor é a demanda de ar solicitada, maior é o percentual de eficiência obtido, como é o caso do período do Dia 3 que apresentou o menor consumo total, mas o maior percentual de eficiência. Por último, foi verificado o potencial de economia caso fossem aplicadas as duas medidas simultaneamente, com resultados de ganhos na ordem de 50%, conforme mostrado na Figura 16.

Figura 16 - Estimativa de economia com a instalação do controle VSD e redução de vazamentos.



Fonte: Elaborado pelo autor.

## 5 ANÁLISE ECONÔMICA

Para a análise econômica das medidas, foi considerado os ganhos percentuais médios verificados nos 5 dias de medição, sendo 29,4% para AEE de adoção do sistema de controle *VSD*, 31,0% para AEE de redução de vazamentos e 51,3% para as ações conjuntas. O benefício financeiro da AEE está diretamente relacionado com a tarifa de energia cobrada pela concessionária de energia ao consumidor. A tarifa com impostos é dada por (MME, 2011):

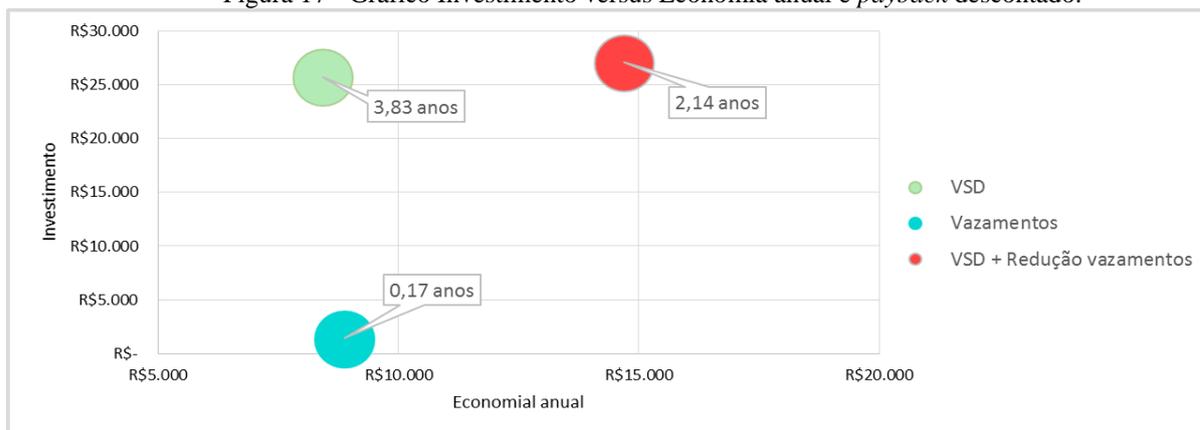
$$Tarifa_{com\ impostos} = \frac{TE + TUSD}{(1 - ICMS - PIS - COFINS)} \quad (8)$$

Onde *TE* e *TUSD* são as tarifas de energia e de uso do sistema de distribuição sem impostos, respectivamente. Os impostos federais de PIS e COFINS possuem alíquotas variáveis de acordo com o mês, e o imposto estadual ICMS é fixo, igual a 18% para indústria no mês de novembro de 2018 no estado do RS. Para o estudo da análise econômica, assumiu-se que não fossem calculados os impostos, uma vez que a indústria obtém abatimento desses valores na produção de bens, sendo a tarifa praticada a simples soma da *TE* e *TUSD*. A *TE* e a *TUSD* adotadas são iguais às registradas no mês de outubro de 2018, com valores de R\$ 0,26259/kWh e R\$ 0,26500/kWh, respectivamente. Com base nos consumos medidos, utilização do compressor e consumo total da unidade de usinagem no mesmo período, admitiu-se que a participação do compressor no consumo total da unidade é de cerca de 30%, valor que será adotado para a extrapolação anual da estimativa de redução de custos, considerando o consumo da unidade de usinagem nos últimos 12 meses. Foi obtida com a estimativa, uma redução anual de R\$ 8.411,77, R\$ 8.869,56 e R\$ 14.677,68 para aplicação do controle *VSD*, redução de vazamentos e ambas as ações, respectivamente.

Foram realizados orçamentos para o levantamento de custos dos investimentos para implementação das AEE. No caso da implementação do controle *VSD* foi levantado o custo da aquisição, instalação e comissionamento do inversor, transmissor de pressão e painel elétrico, com um total de R\$ 25.688,57. Para a realização da redução de vazamentos foi considerado o custo de duas válvulas, uma válvula de retenção que permite a passagem do fluxo de ar do compressor substituto para a linha de distribuição, mas impede o fluxo reverso, em substituição da válvula globo atual que se encontra normalmente aberta; e uma válvula de alívio de pressão para substituir a atual. O custo das válvulas, instalação e serviço de conserto de vazamentos na linha de ar comprimido têm um desembolso total de R\$ 1.380,00. A medida que abrange as duas AEE possui um custo somado das medidas anteriores num total de R\$ 27.068,57. Para a análise de investimentos, foram considerados os conceitos de valor presente líquido (VPL), taxa interna de retorno (TIR) e *payback* descontado. O VPL é dado por:

$$VPL = -Inv + \sum_{n=1}^N \frac{FC_n}{(1 + TMA)^n} \quad (9)$$

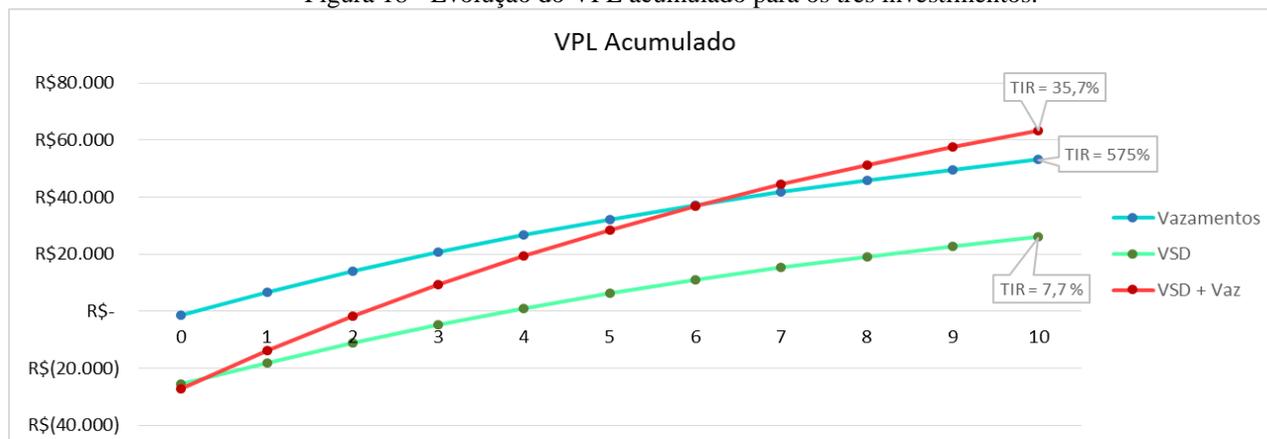
Onde  $FC_n$  é o fluxo de caixa ao final do ano  $n$ ,  $Inv$  é o investimento inicial,  $N$  é o prazo total considerado,  $TMA$  é a taxa mínima de atratividade, que representa o retorno mínimo aceito pelo investidor. Para o estudo, foi considerado um prazo de 10 anos, de acordo com a tabela de depreciação da receita federal para máquinas e equipamentos (RECEITA FEDERAL, 2018). A taxa mínima de atratividade adotada é de 10%, valor frequentemente utilizado em análises de investimento. A TIR é a taxa de atratividade da equação (9) para o VPL igual a zero. E o *payback* descontado é o tempo de retorno do investimento considerando a desvalorização dos ganhos no tempo. A Figura 17, mostra o gráfico do investimento versus economia anual das medidas, bem como os *paybacks* descontados em anos.

Figura 17 - Gráfico Investimento versus Economia anual e *payback* descontado.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Como pode ser observado, os *paybacks* analisados não ultrapassam 4 anos, valores considerados entre adequados e atrativos para investimentos na indústria, com 3,83 anos para a implantação do VSD, 2,14 anos para ambas medidas e apenas 0,17 anos, ou seja, pouco mais de 2 meses para redução de vazamentos. A Figura 18 a seguir apresenta o VPL acumulado no decorrer dos 10 anos da análise e a TIR das ações propostas. Os valores da taxa interna de retorno são de 7,7% para aplicação da tecnologia VSD, 575% para a redução de vazamentos e 35,7% para ambas as medidas, sendo as últimas duas acima da TMA definida de 10%, e reforçando a atratividade da opção de redução dos vazamentos.

Figura 18 - Evolução do VPL acumulado para os três investimentos.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O maior VPL acumulado ao final do décimo ano analisado foi de R\$ 63.119,44 para a AEE que propõe ambas as medidas apresentadas, e sua curva apresenta uma inclinação mais acentuada em relação às demais devido ao maior retorno anual. Já as medidas de redução de vazamentos e troca do sistema de controle pela tecnologia VSD, apresentam VPL de R\$ 53.119,58 e R\$ 25.998,13, respectivamente. Já suas curvas possuem perfis muito semelhantes, uma vez que os ganhos anuais são muito próximos. As curvas são atenuadas no decorrer do período de acordo com a desvalorização dos ganhos anuais no tempo.

## 6 CONCLUSÃO

O presente trabalho proposto foi dividido em dois objetivos principais. O primeiro, de realizar uma revisão acerca dos principais conceitos de medição e verificação de performance que norteiam os projetos de conservação de energia do Programa de Eficiência Energética, além de uma revisão das principais medidas de eficiência energética em sistemas de ar comprimido industrial. E o segundo objetivo foi a avaliação de medidas de eficiência em um sistema real de ar comprimido, onde foi estimado os ganhos

energéticos e financeiros com base nos dados obtidos. O estudo de caso envolveu medições e vistoria em um sistema de ar comprimido de uma indústria metalúrgica para avaliar as ações indicadas. O estudo englobou a avaliação de duas ações de eficiência energética, e uma terceira possibilidade incluindo as duas. A primeira ação envolvendo uma readequação de válvulas e consertos de vazamento de ar comprimido pela tubulação da linha, e a segunda com a substituição do sistema de controle de pressão atual pela tecnologia VSD.

A partir dos resultados obtidos, as ações propostas apresentam um alto potencial de economia de energia, e estão de acordo com valores mencionados na literatura. Os ganhos das duas AEE propostas são da ordem de 30%, e para a medida que inclui as duas AEE o ganho verificado é da ordem de 50%. Do ponto de vista econômico as possibilidades de redução de vazamentos e de ambas medidas são apropriadas para investimento, exibindo indicadores econômicos favoráveis e com TIR acima dos 10% definidos, com destaque para a redução de vazamentos que apresenta baixa complexidade de execução e baixo investimento inicial com um *payback* descontado pouco acima dos 2 meses. A aplicação do VSD apresenta os indicadores menos favoráveis, mas ainda assim é uma alternativa interessante. Cabe salientar que a atratividade dos investimentos está diretamente relacionada com a tarifa de energia paga pela unidade consumidora, que se encontra no Subgrupo B3 Industrial, pagando uma tarifa muito acima da maioria das indústrias que normalmente estão classificadas no Grupo A. Pode-se concluir que com os dados medidos e premissas utilizadas, as AEE avaliadas são recomendadas para implementação no sistema de ar comprimido estudado.

Apesar de o estudo de caso necessitar de mais dados medidos para consolidar as estimativas de longo prazo, o processo desenvolvido nas escolhas das AEE e análises realizadas servem para outros estudos com a mesma finalidade. Por fim, conclui-se que estudos de eficiência energética são de grande importância na indústria pois contribuem para a competitividade das empresas brasileiras frente ao mercado mundial, além de postergar investimentos de infraestrutura do setor elétrico. Cabe a consideração no estudo que em um ambiente industrial, muitas vezes os esforços estão concentrados apenas na produção de bens e operação do parque fabril, ao mesmo tempo que importantes potenciais de eficiência energética são negligenciados.

## **7 TRABALHOS FUTUROS**

Em trabalhos futuros poderia ser feita uma campanha de medição maior e com medição de outras grandezas além da potência, de forma a realizar a estimativa de economia nos moldes de um projeto conforme o Programa de Eficiência Energética da ANEEL. Também poderia ser realizada uma avaliação para uma AEE que será de fato realizada dentro do prazo de realização do estudo, a fim de verificar os resultados comparando o sistema antes e depois da implementação da ação.

Como estudo complementar, poderia ser realizado uma avaliação técnica e econômica dos ganhos provenientes da recuperação de calor do compressor, medida que frequentemente apresenta grandes potenciais de economia, além de uma avaliação do potencial de economia ao reduzir as perdas de carga do sistema.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACEEE - Kallakuri C, et al. The 2016 international energy efficiency scorecard. American Council for an Energy Efficient Economy. 2016. Disponível em <<http://aceee.org/research-report/e1602>>. Acesso em 15/03/18.

Aguiar, Victor de Paula Brandão. **Estudo de Eficiência Energética no Acionamento de um Compressor Parafuso em um Sistema De Ar Comprimido**. Fortaleza, 2008. Disponível em <<http://www.lamotriz.ufc.br/Artigos/dissertacao%5B4%5D.pdf>>. Acesso em 09/10/2018.

ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - **Procedimentos do Programa de Eficiência Energética – PROPEE**. 10 Módulos. Brasília – DF: ANEEL, 2013.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. **Guia de M&V**. 2014. Disponível em <[http://www.aneel.gov.br/programa-eficiencia-energetica/-/asset\\_publisher/94kK2bHDLPmo/content/medicao-e-verificacao-m-v-/656831?inheritRedirect=false](http://www.aneel.gov.br/programa-eficiencia-energetica/-/asset_publisher/94kK2bHDLPmo/content/medicao-e-verificacao-m-v-/656831?inheritRedirect=false)>. Acesso em 11/08/18.

Atlas Copco. **Compressed Air Manual**. 8ª ed, 2015. Disponível em <[https://www.atlascopco.com/content/dam/atlas-copco/local-countries/egypt/documents/Compressed\\_Air\\_Manual\\_tcm44-1249312.pdf](https://www.atlascopco.com/content/dam/atlas-copco/local-countries/egypt/documents/Compressed_Air_Manual_tcm44-1249312.pdf)>. Acesso em 19/08/18.

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

BHASE, P; LATHKAR, M. **Energy Conservation Using VFD**. In: International Conference on Energy Systems and Applications (ICESA 2015). Pune, India. October 2015. p. 531-536.

CAGI – Compressed Air & Gas Institute. **The Compressed Air and Gas Handbook**. 2016. Disponível em <<http://www.cagi.org/education/handbook.aspx#!prettyPhoto>>. Acesso em 16/08/18.

DINDORF, R. **Estimating Potential Energy Savings in Compressed Air Systems**. In: XIIIth International Scientific and Engineering Conference “HERVICON-2011”. Sumy, Ukraine. Procedia Engineering, v 39, p. 204-211. September 2011.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. **Balanco Energético Nacional**. 2017. Disponível em <[https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio\\_Final\\_BEN\\_2017.pdf](https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2017.pdf)>. Acesso em 05/07/2018.

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

EVO – Efficiency Valuation Organization. **Protocolo Internacional de Medição e Verificação de Performance** – Conceitos e Opções para a Determinação de Economias de Energia e de Água. 2012. Disponível em <[http://www.abesco.com.br/wp-content/uploads/2015/07/PIMVP\\_2012-PTBR.pdf](http://www.abesco.com.br/wp-content/uploads/2015/07/PIMVP_2012-PTBR.pdf)>. Acesso em 15/05/18.

Hanlon, Paul C. **Compressor Handbook**. New York, 2001.

Leite, Fábio Correa. **Modelamento da Eficiência Energética para o Gerenciamento Sustentável no Setor Industrial pela Medição e Verificação**. São Paulo, 2010. Disponível em <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3143/tde-17082010-095942/en.php>>. Acesso em 05/07/2018.

MARQUES, M. C.S. **Eficiência Energética: teoria & prática**. Itajubá, FUPAI, 2007.

MME – Ministério de Minas e Energia. **Manual de Tarifação de Energia Elétrica**. 2011. Disponível em <[http://www.mme.gov.br/documents/10584/1985241/Manual%20de%20Tarif%20En%20EI%20-%20Procel\\_EPP%20-%20Agosto-2011.pdf](http://www.mme.gov.br/documents/10584/1985241/Manual%20de%20Tarif%20En%20EI%20-%20Procel_EPP%20-%20Agosto-2011.pdf)>. Acesso em 09/06/18.

MONTEIRO, M.A.G.; ROCHA, C.A. **Eficiência energética em sistemas de ar comprimido: Manual Prático**. Rio de Janeiro: Eletrobras; Procel, 2005.

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

RECEITA FEDERAL. **Tabela de depreciação: Anexo 1**. Disponível em: <<http://normas.receita.fazenda.gov.br/sijut2consulta/anexoOutros.action?idArquivoBinario=36085>>. Acesso em: 16/11/2018.

RGE – Rio Grande Energia. **Percentuais de PIS/COFINS mensais RGE**. Disponível em <<https://www.cpflempresas.com.br/institucional/piscofins.aspx?emp=8>>. Acesso em 10/11/2018.

ROCHA, N.R. **Eficiência energética em sistemas de ar comprimido**. Rio de Janeiro: Eletrobrás; Procel, 2005.

SANTOS, A.H.M. *et al.* **Conservação de energia: eficiência energética de equipamentos e instalações**. Itajubá: FUPAI, 3ª edição, 2006.

SCHMIDT, C. KISSOCK, K. **Modeling and Simulation of Air Compressor Energy Use**. In: ACEEE Summer Study on Energy in Industry. West Point, United States of America. July 2005. p. 1-12.

SCHMIDT, C. KISSOCK, K. **Power Characteristics of Industrial Air Compressors**. In: Mechanical and Aerospace Engineering Faculty Publications. Dayton, United States of America. 2003.

US DOE - United State Department of Energy. **Energy Tips – Compressed Air: Eliminate Inappropriate Uses of Compressed Air**. 2004. Disponível em <[https://www.energy.gov/sites/prod/files/2014/05/f16/compressed\\_air2.pdf](https://www.energy.gov/sites/prod/files/2014/05/f16/compressed_air2.pdf)>. Acesso em 19/08/18.

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

US DOE - United State Department of Energy. **Improving Motor and Drive System Performance – A Sourcebook for Industry**. 2014. Disponível em <[https://www.energy.gov/sites/prod/files/2014/04/f15/amo\\_motors\\_sourcebook\\_web.pdf](https://www.energy.gov/sites/prod/files/2014/04/f15/amo_motors_sourcebook_web.pdf)>. Acesso em 15/08/18.

## APÊNDICES

### APÊNDICE A – Imagens do Sistema de Ar Comprimido Estudado

a) Imagem do compressor principal, compressor substituto e reservatório de ar.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Imagem do motor do compressor.



b) Perfil do motor



c) Placa de identificação do motor

Fonte: Elaborado pelo autor.

d) Imagem: Filtro de alívio de pressão.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Imagem: Compressor substituto.



e) Filtro por onde há escape de ar



f) Válvula globo na saída de ar

Fonte: Elaborado pelo autor.