

UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL
ÁREA DO CONHECIMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E ENGENHARIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
MESTRADO PROFISSIONAL

DOUGLAS RISCHTER

**MÉTODO PARA CÁLCULO GLOBAL DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM
SISTEMAS DE AR COMPRIMIDO: APLICAÇÃO A TRÊS ESTUDOS DE CASO**

CAXIAS DO SUL

2019

DOUGLAS RISCHTER

**MÉTODO PARA CÁLCULO GLOBAL DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM
SISTEMAS DE AR COMPRIMIDO: APLICAÇÃO A TRÊS ESTUDOS DE CASO**

Dissertação de Mestrado submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade de Caxias do Sul, como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Área de Concentração: Projeto e Fabricação

Linha de Pesquisa: Desempenho e Controle de Sistemas Energéticos

Orientador: Prof. Dr. Carlos Roberto Altafini.

CAXIAS DO SUL

2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Universidade de Caxias do Sul
Sistema de Bibliotecas UCS - Processamento Técnico

R595m Rischter, Douglas

Método para cálculo global de eficiência energética em sistemas de ar comprimido : aplicação a três estudos de caso / Douglas Rischter. – 2019.

89 f. : il. ; 30 cm

Dissertação (Mestrado) - Universidade de Caxias do Sul, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2019.

Orientação: Carlos Roberto Altafini.

1. Energia elétrica - Consumo. 2. Ar comprimido. 3. Motores elétricos. I. Altafini, Carlos Roberto, orient. II. Título.

CDU 2. ed.: 620.9

Catalogação na fonte elaborada pela(o) bibliotecária(o)
Carolina Machado Quadros - CRB 10/2236

“MÉTODO PARA CÁLCULO GLOBAL DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM SISTEMA DE AR COMPRIMIDO: APLICAÇÃO A TRÊS ESTUDOS DE CASO”.

Douglas Rischter

Dissertação de Mestrado submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade de Caxias do Sul, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica, Área de Concentração: Projeto e Fabricação.

Caxias do Sul, 23 de setembro de 2019.

Banca Examinadora:

Dr. Carlos Roberto Altafini

Orientador

Universidade de Caxias do Sul

Dr. Diorge Alex Bao Zambra

Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Dra. Marilda Machado Spindola

Universidade de Caxias do Sul

Dra. Zaida Cristiane dos Reis

Universidade de Caxias do Sul

AGRADECIMENTOS

Inicialmente, agradeço a minha família, minha esposa, minha filha, meus pais e meu irmão, por sempre me incentivar na busca por conhecimento e por ser minha base durante a realização desse trabalho.

Agradeço imensamente ao meu orientador e amigo Prof. Dr. Carlos Roberto Altafini por toda dedicação, amizade e confiança depositada em mim. Muito obrigado pelo acompanhamento, motivação, revisões e sugestões durante o presente trabalho.

Ao instituto SENAI de Tecnologia em Mecatrônica, por ter disponibilizado os equipamentos e instrumentação para o desenvolvimento do trabalho. Agradeço especialmente aos meus colegas de trabalho por todo auxílio, companheirismo, incentivos e conselhos na realização deste trabalho.

Aos componentes da banca pelas contribuições para melhoria do trabalho.

RESUMO

O consumo de energia elétrica vem aumentando em proporções que a geração não acompanha, portanto, quando ações de eficiência energética são realizadas, estas geram mais impactos positivos para a sociedade. Pensando neste viés de redução de consumo de energia, o presente trabalho desenvolveu um método para avaliar a eficiência global em sistemas de ar comprimido. Tal método leva em conta o índice de vazamentos de ar na rede de ar comprimido, perda de carga na canalização na qual o ar escoar e a pressão de ar comprimido fornecida pelo sistema de geração. Para tanto, o método desenvolvido foi implementado em três instalações distintas, cada uma com uma configuração diferente de equipamentos. A aplicação do método na primeira instalação mostrou um potencial de redução de consumo de 39,2% de energia no sistema de ar comprimido, porém após a realização das ações sugeridas, o ganho real foi de 27,9%. A aplicação do método na segunda instalação projetou uma redução no consumo energético de 49,5% no sistema de ar comprimido, e após a implementação das ações o ganho real foi de 11,9%. A aplicação do método na terceira instalação mostrou um potencial de redução energética na ordem de 51,0%, porém após a implementação das ações, o ganho real foi de 9,5%. O fator de maior impacto que ocasionou a diferença entre o ganho projetado para o ganho real nas três instalações foi a não execução das ações sugeridas na sua totalidade por parte das empresas. Os resultados encontrados foram satisfatórios, mostrando a viabilidade da aplicação deste método para calcular a eficiência global em sistemas de ar comprimido.

Palavras-chaves: Ar comprimido; vazamentos, perda de carga, pressão de fornecimento, eficiência energética.

ABSTRACT

The consumption of electricity is increasing in proportions that the generation does not follow, so when energy efficiency actions are carried out, they generate more positive impacts on society. Thinking about this energy consumption reduction bias, the present work developed a method to evaluate the overall efficiency in compressed air systems. Such a method takes into account the air leakage rate in the compressed air network, the pressure drop in the pipe that the air flows and the compressed air pressure provided by the generating system. Therefore, the developed method was implemented in three different installations, each with a different equipment configuration. The application of the method in the first installation showed a potential reduction of 39.2% energy consumption in the compressed air system, but after performing the suggested actions, the real gain was 27.9%. The application of the method in the second installation projected a reduction in energy consumption of 49.5% in the compressed air system, and after the implementation of the actions, the real gain was 11.9%. The application of the method in the third installation showed an energy reduction potential of 51.0%, but after the implementation of the actions, the real gain founded was 9.5%. The major impact factor that caused the difference between the projected gain and the actual gain in the three facilities was the failure of the companies in fully implement the actions suggested. The results were satisfactory, showing the feasibility of applying this method to calculate the overall efficiency in compressed air systems.

Keywords: Compressed air; air leaks, charge loss, supply pressure, energy efficiency.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Fluxo energético 2018/Ano base 2017 - Energia elétrica.....	15
Figura 2 – Evolução das tarifas médias de fornecimento	17
Figura 3 – Custo médio da energia elétrica para a indústria	18
Figura 4 – Percentual de melhoria com ações de eficiência energética em sistemas de ar comprimido	21
Figura 5 – Comparação do consumo energético em compressores com velocidade fixa e de velocidade variável	26
Figura 6 – Relação entre o fator de carga do motor e a eficiência	29
Figura 7 – Esquema representativo da instalação 01	35
Figura 8 – Esquema representativo da instalação 02.....	36
Figura 9 – Esquema representativo da instalação 03.....	38
Figura 10 – Fluxograma resumido.....	41
Figura 11 – Gráfico de potência requerida pelo compressor 02 de 25 hp.....	43
Figura 12 - Gráfico da potência requerida do compressor 01 de 15 hp.....	43
Figura 13 – Gráfico da potência total requerida pelo sistema de ar comprimido da instalação 01	44
Figura 14 – Gráfico da potência ativa total no dia 29/05/2017 do sistema de ar comprimido da instalação 01	44
Figura 15 – Ensaio para medir vazamentos.....	45
Figura 16 – Configuração dos compressores em cascata	49
Figura 17 – Configuração em cascata final da instalação 01	52
Figura 18 – Potência total após intervenção.....	53
Figura 19 – Gráfico da potência ativa total do dia 10/07/2017 do sistema de ar comprimido da instalação 01	54
Figura 20 – Gráfico das potências antes x depois da instalação 01.....	54
Figura 21 – Gráfico de potência requerida pelo compressor.....	57
Figura 22 – Gráfico da potência ativa no dia 12/12/2018 do sistema de ar comprimido da instalação 02	57
Figura 23 – Ensaio para medir vazamentos.....	59
Figura 24 – Potência total após intervenção.....	62
Figura 25 – Gráfico da potência ativa	62
Figura 26 – Gráfico das potências antes x depois da instalação 02.....	63

Figura 27 – Gráfico de potência total requerida pelo sistema de ar comprimido da instalação 03	66
Figura 28 – Gráfico da potência ativa total no dia 28/08/2018 do sistema de ar comprimido da instalação 03	66
Figura 29 – Ensaio para medir vazamentos	68
Figura 30 – Configuração dos compressores em cascata	71
Figura 31 – Potência total após intervenção	74
Figura 32 – Gráfico da potência ativa total do dia 04/09/2018 do sistema de ar comprimido da instalação 03	74
Figura 33 – Gráfico das potências antes x depois da instalação 03	75
Figura 34 – Fluxograma proposto	89

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Especificações dos compressores da instalação 01	35
Tabela 2 - Especificações do compressor da instalação 02	36
Tabela 3 - Especificações do compressor da instalação 03	38
Tabela 4 - Equipamentos para medição.....	39
Tabela 5 – Configuração atual dos compressores da instalação 01	48
Tabela 6 – Sugestão de configuração da instalação 01	48
Tabela 7 – Configuração final da instalação 01	52
Tabela 8 – Resumo potência, consumo e custo antes x depois	55
Tabela 9 – Custos do projeto	55
Tabela 10 – Retorno do investimento.....	56
Tabela 11 – Resumo potência, consumo e custo antes x depois	63
Tabela 12 – Custos do projeto	63
Tabela 13 – Retorno do investimento.....	64
Tabela 14 – Configuração atual dos compressores da instalação 03.....	70
Tabela 15 – Sugestão de configuração da instalação 03	71
Tabela 16 – Resumo potência, consumo e custo antes x depois	75
Tabela 17 – Custos do projeto	75
Tabela 18 – Retorno do investimento.....	76
Tabela 19 – Síntese dos resultados	77
Tabela 20 – Leitura dos analisadores de energia.....	86

LISTA DE SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CNC	Comando Numérico Computadorizado
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
FGV	Fundação Getúlio Vargas
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IGP-DI	Índice Geral de Preços – Disponibilidade Interna
IPCA	Índice de Preços ao Consumidor Amplo
MME	Ministério de Minas e Energia
TIR	Taxa Interna de Retorno
TMA	Taxa Mínima de Atratividade
UPF	Unidade Padrão Fiscal

LISTA DE SÍMBOLOS

Δp_c	Índice de perda de carga
Δp_f	Índice da pressão de fornecimento
FC_0	Valor do fluxo de caixa no instante 0 [R\$]
FC_j	Fluxos previstos de entradas e saídas de caixa [R\$]
i	Taxa de desconto [%]
p_1	Pressão manométrica no ponto 1 [bar]
P_1	Potência elétrica no ponto 1 [kW]
p_2	Pressão manométrica no ponto 2 [bar]
P_2	Potência elétrica no ponto 2 [kW]
p_{af}	Pressão manométrica medida no ponto mais afastado [bar]
p_f	Pressão de fornecimento de ar comprimido [bar]
p_{rq}	Pressão manométrica requerida pelos equipamentos [bar]
PV	Percentual de Vazamento
Q	Capacidade de deslocamento de ar [m ³ /min]
Q_1	Vazão volumétrica no ponto 1 [m ³ /min]
Q_2	Vazão volumétrica no ponto 2 [m ³ /min]
t_a	Tempo em alívio [min]
t_c	Tempo em carga [min]
V_1	Velocidade no ponto 1 [m ² /s]
V_2	Velocidade no ponto 2 [m ² /s]
VV	Volume de Vazamento

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
1.1 JUSTIFICATIVA	16
1.2 OBJETIVOS	19
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	20
2.1 AR COMPRIMIDO.....	20
2.2 MOTORES ELÉTRICOS	28
2.3 ANÁLISE DE INVESTIMENTOS.....	32
2.3.1 Taxa interna de retorno (TIR)	32
2.3.2 Período de <i>Payback time</i>	33
3 MATERIAIS E MÉTODOS	34
3.1 CARACTERIZAÇÃO DAS INSTALAÇÕES AVALIADAS.....	34
3.1.1 Primeira instalação.....	34
3.1.2 Segunda instalação	35
3.1.3 Terceira instalação	37
3.2 INSTRUMENTAÇÃO	39
3.3 MÉTODO PROPOSTO PARA VERIFICAÇÃO DOS DESPERDÍCIOS DE ENERGIA NOS SISTEMAS DE AR COMPRIMIDO.....	39
3.4 FLUXOGRAMA DO MÉTODO PROPOSTO.....	41
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	42
4.1 DETERMINAÇÃO DAS OPORTUNIDADES DE EFICIENTIZAÇÃO DO SISTEMA DE AR COMPRIMIDO NA PRIMEIRA INSTALAÇÃO	42
4.1.1 Potências elétricas requeridas pelos compressores de ar comprimido.....	42
4.1.2 Índice de vazamentos de ar comprimido	44
4.1.3 Parametrização dos compressores e pressão de trabalho.....	45
4.1.4 Diagnóstico	46
4.1.5 Ações sugeridas para redução do consumo de energia	47
4.1.5.1 Pressão de trabalho e parametrização dos compressores.....	47
4.1.5.2 Perda de carga do sistema.....	49

4.1.5.3 Redução de vazamentos.....	50
4.1.6 Ações realizadas e resultados finais	51
4.1.6.1 Redução de Vazamentos.....	51
4.1.6.2 Redução da pressão de trabalho e parametrização dos compressores	51
4.1.6.3 Redução da perda de carga	53
4.1.7 Medição após a realização das ações e resultado final.....	53
4.1.8 Análise de retorno do investimento (payback descontado)	55
4.2 DETERMINAÇÃO DAS OPORTUNIDADES DE EFICIENTIZAÇÃO DO SISTEMA DE AR COMPRIMIDO NA SEGUNDA INSTALAÇÃO	56
4.2.1 Potências elétricas requeridas pelos compressores de ar comprimido.....	57
4.2.2 Índice de vazamentos de ar comprimido	58
4.2.3 Parametrização do compressor e pressão de trabalho.....	59
4.2.4 Diagnóstico	60
4.2.5 Ação sugerida para redução de energia	60
4.2.6 Ações realizadas e resultados finais	61
4.2.7 Medição após a realização das ações e resultado final	61
4.2.8 Análise de retorno do investimento (payback descontado)	64
4.3 DETERMINAÇÃO DAS OPORTUNIDADES DE EFICIENTIZAÇÃO DO SISTEMA DE AR COMPRIMIDO NA TERCEIRA INSTALAÇÃO.....	65
4.3.1 Potências elétricas requeridas pelos compressores de ar comprimido.....	65
4.3.2 Índice de vazamentos de ar comprimido	67
4.3.3 Parametrização dos compressores e pressão de trabalho.....	68
4.3.4 Diagnóstico	69
4.3.5 Ações sugeridas para redução de energia.....	70
4.3.5.1 Pressão de trabalho e parametrização dos compressores.....	70
4.3.5.2 Redução de vazamentos.....	72
4.3.6 Ações realizadas e resultados finais	72
4.3.6.1 Redução de Vazamentos.....	72
4.3.6.2 Redução da pressão de trabalho e parametrização dos compressores	73
4.3.7 Medição após a realização das ações e resultado final	73
4.3.8 Análise de retorno do investimento (payback descontado)	76
4.4 SÍNTESE DOS RESULTADOS	77

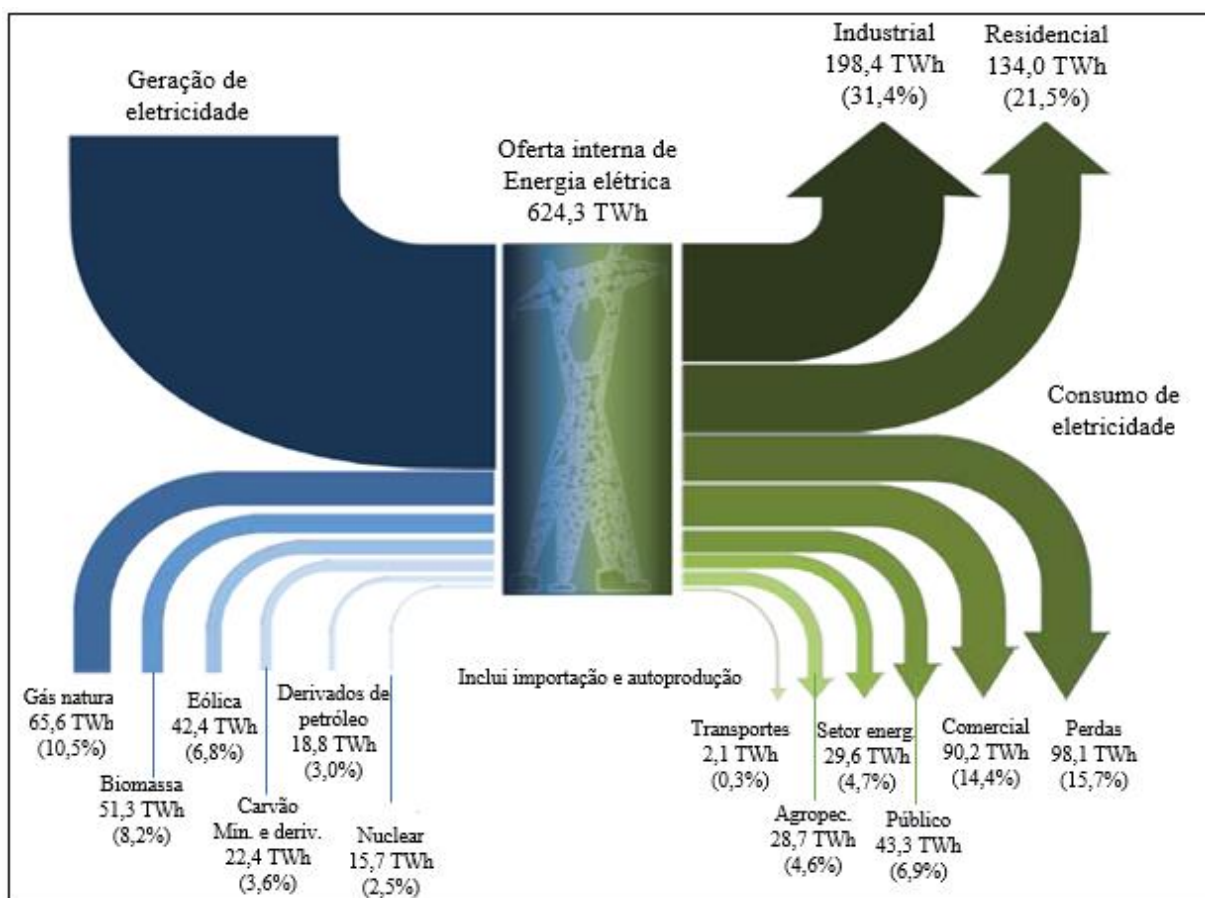
5 CONCLUSÕES.....	79
REFERÊNCIAS	81
APÊNDICE A – LEITURA COMPARATIVA DOS ANALISADORES DE ENERGIA	86
APÊNDICE B – FLUXOGRAMA	89

1 INTRODUÇÃO

A utilização de energia pela indústria tem sua importância aumentada à medida que mais tecnologia é agregada aos processos de transformação, requerendo em contrapartida, a disponibilidade de maiores insumos energéticos. Os setores industriais necessitam de volumes elevados de energia para realizarem seus processos. De modo geral, a energia utilizada pela indústria provém de diversas fontes primárias, sendo estas, eletricidade, carvão vegetal, lenha, energia solar, carvão mineral, óleo combustível e gás natural (GODOI, 2011).

O montante de 65,4% da energia elétrica brasileira é proveniente de hidroelétricas, 15,0% de outras fontes renováveis, como biomassa e eólica. A energia nuclear também possui participação de 2,5% (Figura 1). Enquanto 17,1% da energia elétrica brasileira é gerada a partir da queima de combustíveis fósseis e seus derivados, como gás natural, derivados de petróleo e carvão mineral (MME; EPE, 2018).

Figura 1 - Fluxo energético 2018/Ano base 2017 - Energia elétrica



Fonte: adaptado de MME; EPE (2018).

Nas indústrias de processos siderúrgicos e metalúrgicos, o carvão e a eletricidade são insumos amplamente utilizados (LEITE; BAJAY; GORLA, 2010). O processo de manufatura metalmeccânico, que utiliza principalmente processos de usinagem, corte, dobra, soldagem, entre outros, tem em grande parte de suas máquinas ferramentas acionadas por energia elétrica.

A utilização de energia elétrica nestes processos oferece uma grande versatilidade, pois esta pode ser convertida em outras formas de energia (IEEE PES GENERAL MEETING TO BE HELD IN TAMPA, 2007). Devido a esta possibilidade, o seu uso pode ser visto em diversas aplicações como aquecimento, refrigeração, iluminação, climatização, entre outras.

1.1 JUSTIFICATIVA

O avanço da industrialização juntamente com o crescimento populacional faz com que a demanda de energia seja crescente, observando que a oferta de energia está cada vez mais limitada pela capacidade dos sistemas de geração elétrica existentes atualmente. Além disso, há o aumento dos custos na geração e distribuição da energia elétrica, elevando os custos da indústria com esse insumo.

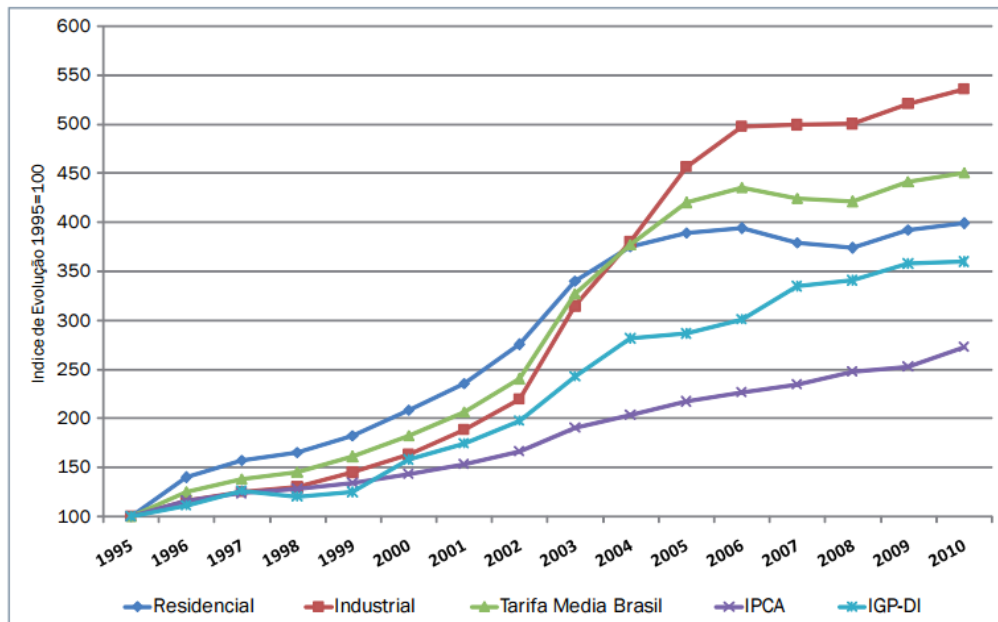
A utilização do ar comprimido como utilidade é larga e intensamente difundida nas indústrias, a produção desta utilidade industrial é diretamente proporcional ao consumo de energia elétrica, sendo que a perda de ar comprimido significa um maior consumo de energia elétrica (ROCHA; MONTEIRO, 2005).

Estima-se que aproximadamente 10% de toda a energia utilizada pela indústria é consumida por sistemas de ar comprimido e, deste montante energético, de 10% a 50% são desperdiçados através de vazamentos de ar comprimido, utilização indevida, parametrização de pressões de trabalho inadequada, entre outros. (ABDELAZIZ; SAIDUR; MEKHILEF, 2011; DINDORF, 2012; DUDIĆ *et al.*, 2012; LIAO *et al.* 2013; SAIDUR; HASANUZZAMAN; RAHIM, 2011).

Uma compilação de dados da ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica), IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística) e FGV (Fundação Getúlio Vargas), demonstra através do gráfico comparativo na Figura 2, a crescente elevação do custo da energia elétrica para a indústria em relação à tarifa residencial, ao IPCA (Índice de Preços ao Consumidor Amplo) e ao IGP-DI (Índice Geral de Preços – Disponibilidade Interna). No gráfico da Figura 2 é apresentada a evolução acumulada dos indicadores com referência ao ano de 1995, mostrando um percentual de quase 550% no aumento dos custos da energia elétrica para a

indústria e de 400% para o custo da energia residencial até o ano de 2010, aumento acumulado inferior a 300% para o IPCA e um pouco superior de 350% para o IGP-DI (BONINI, 2011).

Figura 2 – Evolução das tarifas médias de fornecimento



Fonte: adaptado de Bonini (2011).

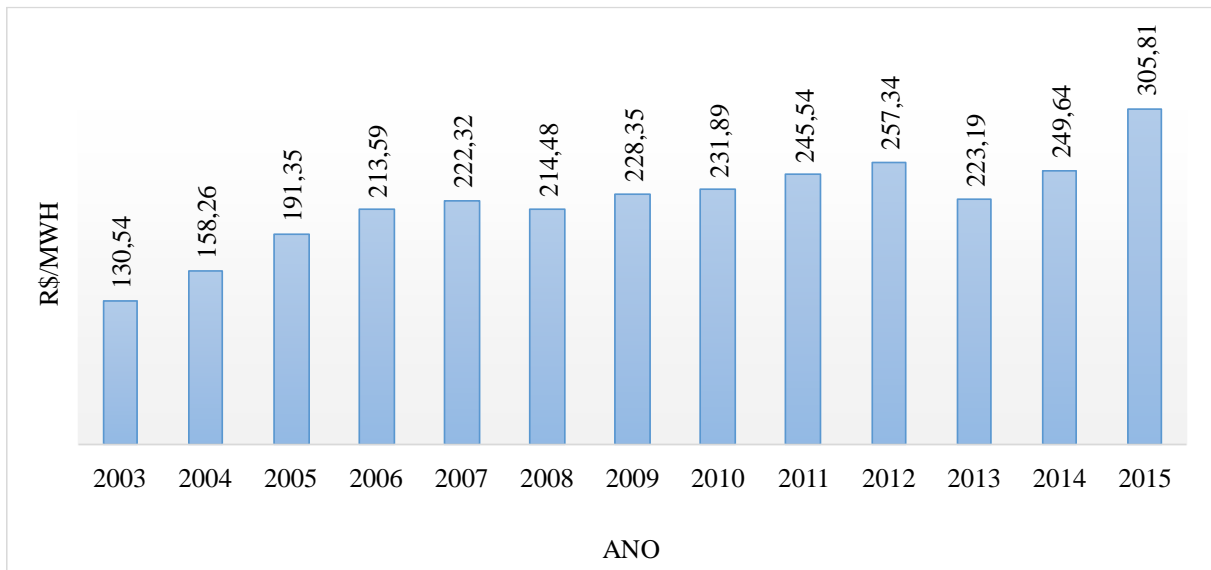
A Figura 3 apresenta a evolução do custo da energia para a indústria segundo dados da ANEEL (2016). Foram considerados os custos da energia elétrica para o mês de março dos anos de 2003 a 2015. No gráfico pode ser observada a redução no custo da energia para o ano de 2013, seguido de um aumento no valor da energia de 26,45 R\$/MWh para 2014 e de 56,17 R\$/MWh para 2015.

Os recursos energéticos, ao longo do tempo, vêm se tornando cada vez mais caros e limitados. Para suprir estas necessidades de prover recursos, políticas de incentivo à redução de desperdício energético, como normas regulamentadoras, programas de conservação de energia estão se tornando uma tendência mundial. Com o passar dos anos, o número de políticas ligadas a ações de eficiência energética vem aumentando e se tornando cada vez mais abrangente (TANAKA, 2011). O selo PROCEL para motores elétricos e equipamentos eletroeletrônicos, estabelecendo valores mínimos de eficiência energética, é uma política de eficiência energética.

No Brasil, o setor industrial é responsável por aproximadamente um terço do consumo da energia elétrica (MME; EPE, 2018). Os dados obtidos pela pesquisa de posse de equipamentos e hábitos de uso (ELETROBRAS, 2008) para o ano base de 2005 apontavam uma participação média do custo de energia elétrica nos custos totais de produção na indústria em 9,2%,

estimativa aumentada no setor de metalurgia básica, onde esta medida ultrapassou 12%. Esta pesquisa envolveu 478 empresas, 33% das empresas admitiram ser possível a redução no consumo de energia superior a 5%, sendo que destas 12% afirmaram ser possível reduções superiores a 10%.

Figura 3 – Custo médio da energia elétrica para a indústria



Fonte: adaptado de ANEEL (2015).

Segundo Godoi (2011), por mais que o consumo de energia utilizado por parte das indústrias seja elevado, existe uma grande dificuldade quando estas necessitam reduzir estes gastos, sendo os principais obstáculos, a dificuldades de acesso a certas tecnologias que proporcionariam esta redução, uma desconfiança nos resultados de projetos de redução de consumo além de falta de informações.

Em trabalhos onde foram almeçadas ações de eficiência energética, realizado pelo autor em onze empresas de porte médio, entre setembro de 2018 e março de 2019, apontou que o sistema de ar comprimido foi responsável por 68,6% das ações de redução de consumo de energia. Esse valor percentual representou um montante energético de 1041,2 MWh/ano e uma economia financeira de R\$ 494.241,45.

Os valores acima evidenciam que a criação de um método para avaliar a eficiência energética de sistemas de ar comprimido se mostra de extrema importância para o âmbito industrial, visto que o consumo energético e os desperdícios com energia são elevados.

1.2 OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo geral o desenvolvimento de um método para a determinação dos ganhos globais de eficiência energética baseado em pelo menos três diferentes instalações de ar comprimido.

Para atender ao objetivo geral, são definidos os seguintes objetivos específicos:

- a) identificar os parâmetros que devem ser medidos e comuns a todas as três instalações de ar comprimido analisadas;
- b) distinguir as principais perdas energéticas contidas nas três instalações;
- c) caracterizar as ações de eficiência a serem determinadas e quais os resultados possíveis;
- d) analisar os ganhos financeiros das ações de eficiência energética executadas.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo é apresentada a fundamentação teórica referente ao assunto proposto, trazendo uma abordagem de temas chave que devem ser observados para o estudo de eficiência energética em sistemas de ar comprimido.

2.1 AR COMPRIMIDO

O volume de energia que pode ser economizado em sistemas de ar comprimido varia de 20% a 50%, uma faixa bastante ampla e que está relacionada a fatores tecnológicos, de manutenção, dimensionamento, operacionais e de controle. De maneira mais ampla, o ar comprimido é uma utilidade muito empregada na indústria, e para entender o potencial de melhoria em eficiência faz-se necessário observar como o ar comprimido é gerado, armazenado, transportado e utilizado (KUMAR, 2010; O'RIELLY; JESWIET, 2014; SAIDUR; RAHIM; HASANUZZAMAN, 2010).

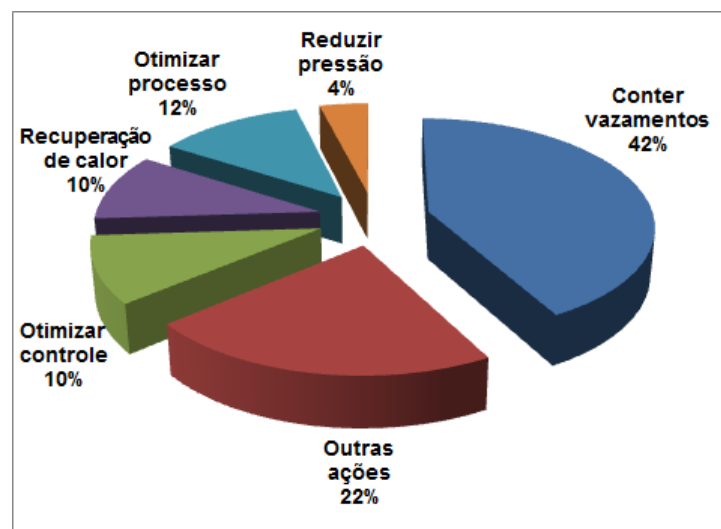
Para Dindorf (2012), o ar comprimido é uma das mais caras formas de energia utilizada na indústria. Em uma análise estendida ao ciclo de vida de um compressor de ar, os custos respondem a uma proporção de 16% para a aquisição e instalação do sistema, 6% para a manutenção e 78% com energia (SAIDUR; HASANUZZAMAN; RAHIM, 2011).

No Brasil, as indústrias do setor de manufatura metalmecânica utilizam amplamente sistemas pneumáticos em seus processos e, geralmente, oferecem um grande potencial de redução do consumo de energia, superior a outros países industrializados. Estima-se que o potencial efetivo de redução no consumo energético aplicado a sistemas de ar comprimido em países da união europeia, Canadá e Estados Unidos seja de 21% a 28%, enquanto que no Brasil este potencial é de 42% (MCKANE; HASANBEIGI, 2011).

O gráfico da Figura 4 demonstra o percentual de melhoria com ações em sistemas de ar comprimido com foco na conservação de energia, com grande ênfase nas perdas por vazamentos, sendo esses responsáveis pelas maiores perdas em sistemas pneumáticos. Na indústria o percentual médio de vazamentos é de 20% a 40% do ar utilizado (DUDIĆ *et al.*, 2012). Indiretamente, os vazamentos aceleram a degradação dos elementos do sistema de ar comprimido, contribuindo para a redução da vida útil dos sistemas pneumáticos e para o aumento no consumo de energia (ABDELAZIZ; SAIDUR; MEKHILEF, 2011).

O volume de ar perdido em um vazamento varia em função de parâmetros como pressão e diâmetro do furo. A dificuldade em detectar os vazamentos se dá pela limitação da percepção visual ou acústica sem o uso de instrumentos adequados (YANG, 2009). Os vazamentos geralmente ocorrem em pontos de junção da tubulação, conexões, válvulas, filtros e atuadores. A total eliminação de vazamentos de ar comprimido é inexecutável, e por isso uma taxa de até 10% de vazamentos é considerada aceitável (SAIDUR; HASANUZZAMAN; RAHIM, 2011).

Figura 4 – Percentual de melhoria com ações de eficiência energética em sistemas de ar comprimido



Fonte: adaptado de Duflou *et al.* (2012).

Segundo Abdelaziz, Saidur e Mekhilef (2011), quanto maior são os vazamentos maiores são os desperdícios, porém são detectáveis mais facilmente e a quantidade de ar comprimido perdida está relacionada exponencialmente ao diâmetro destes orifícios. A correção de vazamentos de grandes dimensões ocorre com a prática de manutenções rotineiras e adequadas, porém para a detecção de vazamentos de pequenas dimensões pode ser necessário a utilização de equipamentos de medição especial. Conforme Dudić *et al.* (2012), o uso de visão termográfica e medição acústica por ultrassom para identificação de vazamentos, são técnicas para identificar pontos de vazamentos de ar comprimido de pequenas dimensões, ou seja, inferiores a 1 mm de diâmetro.

Estratégias de detecção de vazamentos e reparações exigem tempo e equipamentos, porém, com custos relativamente baixos frente ao benefício obtido. Saidur, Rahim e Hasanuzzaman (2010), em análises de estudos de caso, concluem que a eliminação de

vazamentos em sistemas de ar comprimido se apresenta como uma prática de baixo custo relativo, com tempo de retorno geralmente inferior a 12 meses.

Para se estimar o percentual de ar comprimido perdido por um sistema, Kumar (2010) sugere um procedimento que consiste em 3 passos:

- 1) Desligar todos os sistemas de consumo pneumático, ou realizar o teste quando houver garantias que os equipamentos não estão consumindo ar comprimido para seus processos.
- 2) Aguardar o compressor entrar em carga até atingir a pressão de operação (ou entrar em modo alívio). A partir deste momento, registrar os tempos entre os estados de carga (t_c) e alívio (t_a). Para maior acurácia, é sugerido o monitoramento de 8 a 10 ciclos de funcionamento.
- 3) O percentual de vazamentos (PV) do sistema é calculado pela Equação (1).

$$PV = \frac{100 \cdot \sum t_c}{(\sum t_c + \sum t_a)} \quad (1)$$

O volume de vazamento (VV) do sistema pode ser calculado pela Equação (2)

$$VV = \frac{Q \cdot \sum t_c}{(\sum t_c + \sum t_a)} \quad (2)$$

onde Q é a capacidade de deslocamento de ar do compressor em m^3/min .

As práticas de manutenção também são fundamentais para o melhor aproveitamento energético nos sistemas pneumáticos. Para Abdelaziz, Saidur, e Mekhilef (2011), a energia desperdiçada em sistemas de compressão de ar ineficientes devido à problemas de manutenção pode chegar a 50% do total de energia consumida pelo compressor. Segundo os autores, além das perdas por vazamentos não tratados, outros fatores podem causar redução na eficiência dos sistemas de compressão de ar, são esses: falta de controle na pressão disponibilizada às aplicações e falhas na manutenção devido à falta de limpeza e substituição de filtros e a corrosão ou contaminação interna da tubulação pela falta de equipamento ou de procedimentos de purga¹.

Segundo Kumar (2010) deve-se manter válvulas em bom estado, pois válvulas desgastadas podem representar perdas de até 50%. Outra sugestão do autor é a instalação de

¹ Processo de eliminar condensado de forma automática ou manual do sistema de ar comprimido.

diversos pontos de medição de pressão em linhas longas, monitorando possíveis perdas decorrentes de tubulação suja ou com excesso de curvas e/ou estrangulamentos.

De acordo com Kumar (2010), mesmo as tecnologias mais recentes podem apresentar quedas significativas de eficiência em função de desgastes e do uso, que podem ser medidas por meio da verificação periódica do volume de ar fornecido pelo equipamento. Uma redução significativa do consumo de energia elétrica em sistemas de compressão de ar pode ser obtida por meio de práticas adequadas e medição de eficiência. Auditorias periódicas e os comparativos nos indicadores de desempenho do sistema pneumático podem auxiliar na identificação de anomalias, evitando perdas cumulativas (NEALE; KAMP, 2009).

Além da tubulação e dos atuadores, o superdimensionamento dos sistemas de compressão também demanda um maior consumo energético, devendo ser bem estudados para evitar que critérios de planejamento para futuras expansões ou centralizações levem a unidades de compressão com uma capacidade muito além da necessária. Dois fatores que influenciam muito nos custos dos sistemas de ar comprimido são o tipo e o tamanho do sistema de compressão. Compressores superdimensionados tendem a operar de modo ineficiente, além de oferecer maior custo de manutenção (SAIDUR; HASANUZZAMAN; RAHIM, 2011). Uma oportunidade de melhoria surge ao se observar que o compressor instalado possui capacidade para atender mais do que o dobro da necessidade atual da empresa, revelando o superdimensionamento como um importante fator de ineficiência energética. Por isso, muitas vezes é recomendada a substituição do compressor por um de menor porte com o objetivo de reduzir as perdas geradas pelo superdimensionamento (KUMAR, 2010).

Em plantas industriais amplas, muitas empresas optam pela centralização do sistema de compressão, exigindo redes de distribuição extensas. Nestas situações, sugere-se a instalação de um compressor menor próximo dos pontos de demanda que estão distantes da central de compressão principal, diminuindo perdas decorrentes das linhas de transmissão e a possibilidade de vazamentos (KUMAR, 2010).

A atualização tecnológica pela substituição de parte ou de todo o sistema de compressão é uma possibilidade que deve ser constantemente avaliada, pois compressores antigos tendem a utilizar motores de baixo rendimento devido a sua idade, principalmente quando operando em regimes de superdimensionamento. Compressores mais novos e eficientes que possuem sistemas automáticos de controle de velocidade consomem aproximadamente 35% menos de energia (SAIDUR; RAHIM; HASANUZZAMAN, 2010). Tecnologias como purgas de baixas

perdas, compressão em mais de um estágio e motores de maior rendimento devem ser consideradas (DINDORF, 2012).

Na escolha de um novo sistema de compressão, deve ser considerada uma série de fatores, tais como custo de aquisição, fluxo, capacidade dos reservatórios, variação da demanda e pico de demanda. Para auxiliar no processo de tomada de decisão, Mousavi, Kara, e Kornfeld (2014) sugerem o uso de sistemas de simulação para avaliar possíveis cenários e auxiliar na escolha da melhor estratégia, que pode variar significativamente devido às características de consumo e das tecnologias de compressão.

Na substituição ou implantação de sistemas de compressão, o critério de eficiência deve ser considerado em função das características de consumo do ar comprimido. A tecnologia e o porte do compressor escolhido podem gerar variações de desempenho significativas dependendo da aplicação. Segundo Kumar (2010), enquanto os compressores centrífugos possuem um consumo médio de 4,8 kW/m³, compressores de tecnologia mais simples, como os alternativos a pistão refrigerados a ar, muito utilizados em sistemas industriais de pequenas e médias empresas, apresentam um consumo médio de 7,8 kW/m³. Compressores parafuso, por sua vez, apresentam um consumo médio de 6,5 kW/m³.

Tecnologias complementares ao sistema de compressão, como secadores e resfriadores melhoram a qualidade do ar e oferecem melhor aproveitamento energético. Alguns sistemas de secagem permitem menores perdas, removendo a umidade do ar e resfriando-o, aumentando a eficiência da compressão. Sistemas de purga removem a umidade do ar já comprimido, porém, podem desperdiçar energia ao realizar a liberação de pressão por tempo excessivo em intervalos muito curtos de tempo. Kumar (2010) sugere a opção por sistemas regenerativos, que oferecem maior eficiência energética, e que utilizam a recuperação térmica do compressor para realizar a evaporação da umidade.

O local de instalação dos sistemas de compressão de ar também exerce influência no consumo energético. A instalação de compressores em ambientes excessivamente quentes e úmidos eleva o consumo energético e diminui a qualidade do ar comprimido. Com o resfriamento do ar de entrada no sistema de compressão, pode-se obter uma economia energética de aproximadamente 1% para cada 3 °C de redução (DINDORF, 2012). Esta redução na temperatura do ar admitido pelo compressor pode ser realizada com o uso de sistemas de resfriamento assistido, ou ainda pela adoção de estratégias de captação de ar externo por dutos em ambientes confinados.

O posicionamento de um compressor em um local com poeira ou partículas em suspensão pode afetar significativamente a eficiência de todo o sistema. Ações como a mudança na captação do ar de um sistema de compressão pode acarretar em uma significativa redução da temperatura no ar de entrada, e conseqüentemente uma redução na quantidade de energia elétrica utilizada pelo sistema. Se o ar captado pelo sistema de compressão possuir muitas partículas suspensas como poeira ou fuligem de produção, a eficiência de um sistema de compressão pode ser reduzida, gerando um aumento no consumo de energia de até 2% (PRASHANTH *et al.*, 2014). Para Dindorf (2012), filtrar e secar o ar é necessário, porém, o excesso de filtros ou filtros muito finos e sistemas de secagem superdimensionados podem gerar desperdícios energéticos em até 6%.

A escolha de reservatórios adequados ao consumo do sistema é de suma importância, e deve ser realizada em função da tecnologia de compressão e da característica de demanda de ar. Para Dindorf (2012), o dimensionamento dos reservatórios pneumáticos deve permitir o funcionamento intensivo dos compressores durante a fase de carga, evitando acionamentos intermitentes indesejados. O autor ainda aponta a importância da instalação de sistemas de medição para pressão, vazão e corrente elétrica. Informações obtidas pelos instrumentos auxiliam na tomada de decisão e nos ajustes de dimensionamento do sistema.

Em empresas do setor metalmeccânico, práticas de limpeza de máquinas por meio da utilização de jatos de ar comprimido são bastante comuns. Neste sistema, um volume significativo de ar comprimido é utilizado para a remoção e deslocamento dos resíduos, porém, com grande aspensão de fluidos e geração indesejada de ruído (NEALE; KAMP, 2009). Para Dindorf (2012), deve-se preferir, sempre que possível, o uso de aspiradores de pó ao uso de jatos de ar comprimido para remoção de partículas. Esta prática pode reduzir o consumo de ar em até 40%.

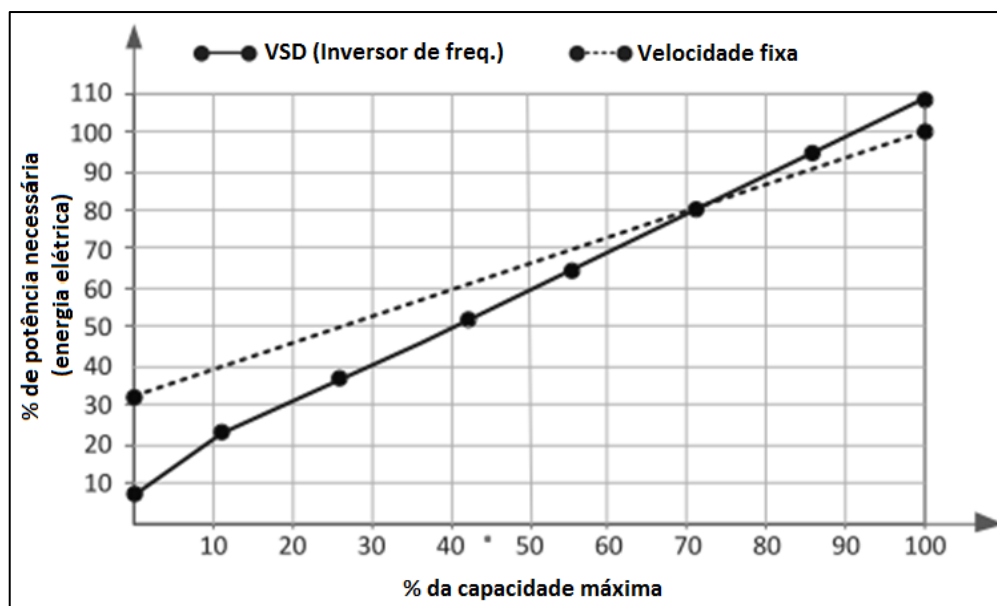
O uso de alternativas a sistemas pneumáticos pode oferecer significativas vantagens em termos de conservação de energia. A energia pneumática deve ser considerada uma energia nobre, pois ela é o resultado de sucessivas transformações com consideráveis perdas, sendo uma forma de energia relativamente cara (DINDORF, 2012). O estudo de alternativas ao uso de sistemas pneumáticos são sugeridas, como o uso de sopradores para resfriamento, sistemas hidráulicos em acionamentos e sistemas eletrônicos no lugar de controles pneumáticos (KUMAR, 2010).

Atualmente, algumas máquinas ferramenta utilizam ar comprimido em movimentações de barreiras físicas de segurança, tais como portas e escotilhas, e também na lubrificação e

refrigeração, além da possibilidade de uso para a fixação das ferramentas e das peças em sistemas de troca rápida. Tais sistemas são grandes consumidores de ar comprimido, podendo estar consumindo alguma quantidade de ar mesmo quando a máquina não está em operação. A instalação de eletroválvulas para interromper automaticamente o fluxo de ar comprimido às máquinas quando estas estiverem desligadas minimiza as perdas (DINDORF, 2012).

Da mesma forma que em outras aplicações, os motores elétricos utilizados em sistemas de compressão possuem uma vida média estimada em 20 anos, sendo comum a utilização de técnicas de recuperação em motores que param de funcionar, reduzindo a eficiência energética de todo o sistema de compressão (SAIDUR, 2010). No caso de um motor de compressor superdimensionado ou de uma carga variável que dificilmente exige mais de 70% da capacidade do motor, a utilização de controladores de velocidade permite a redução no consumo de energia (Figura 5).

Figura 5 – Comparação do consumo energético em compressores com velocidade fixa e de velocidade variável



Fonte: adaptado de Mousavi, Kara, e Kornfeld (2014).

Segundo Dindorf (2012), a utilização de motores elétricos com partida direta ou velocidades fixas gera desperdícios energéticos e prejudica a qualidade da energia. A partir da utilização de controladores de velocidade nos motores dos compressores de ar é possível uma redução média de 15% no consumo de energia elétrica para o sistema de compressão, podendo chegar a 35% de redução em alguns casos.

Além disso, o uso de sistemas controladores de velocidade pode permitir o acoplamento do motor diretamente ao compressor, eliminando a necessidade de polias e correias e o consequente desperdício energético inerente aos sistemas de acoplamento. Com o uso de controle de velocidade por inversores de frequência, o motor pode operar em regimes mais suaves nos momentos de pouca demanda, evitando o funcionamento intermitente que reduz a vida útil do motor e diminui a eficiência energética (MOUSAVI; KARA; KORNFELD, 2014).

Em sistemas que estão operando com pressão acima da necessária para o uso, o potencial para conservação energética está na redução dos limites de trabalho dos compressores. Alterar a configuração da pressão de ativação e de desligamento de um compressor é relativamente fácil e pode ser realizado pela equipe de manutenção ou pessoal capacitado, sendo uma medida de custo insignificante, porém, com grandes resultados e de efeito imediato (SAIDUR; RAHIM; HASANUZZAMAN, 2010). A cada 1 bar de redução na pressão do sistema pneumático, obtém-se uma redução média de 8% no consumo de energia elétrica (DINDORF, 2012). Em muitos casos a pressão pode ser diminuída após a identificação de restrições na rede pneumática e reconfiguração dos redutores de pressão dos equipamentos (ABDELAZIZ; SAIDUR; MEKHILEF, 2011).

O potencial para economia de energia elétrica pela substituição de motores em compressores antigos por outros de maior rendimento ou a aplicação de controladores de velocidade em compressores é diretamente proporcional ao tamanho do motor controlado. Para isso, é necessária uma avaliação aprofundada para verificar a viabilidade e o tempo de retorno de investimento neste tipo de melhoria (SAIDUR; RAHIM; HASANUZZAMAN, 2010). Para Kumar (2010), compressores de velocidade fixa com potência superior a 100 kW são os mais recomendados para a instalação de controladores de velocidade.

Em reservatórios e tubulações de ar comprimido, a umidade retida se condensa gerando acúmulo de água. Com objetivo de manter a qualidade do sistema pneumático, purgadores automáticos ou manuais são instalados no sistema em pontos específicos da tubulação e reservatórios. Nos sistemas de purgas automáticas por temporização geralmente é possível a programação dos tempos de purga e dos intervalos em que estas ocorrem. Nem sempre os sistemas estão funcionando a uma frequência adequada, e a diminuição na frequência e no tempo de abertura pode proporcionar uma purga suficiente com menor desperdício energético (KUMAR, 2010).

Para demandas que justificam a utilização de mais de um sistema de ar comprimido, a utilização de compressores de diferentes tecnologias pode ser realizada por meio da integração

dos sistemas de controle e a otimização das faixas de pressão para cada sistema de compressão. Mousavi, Kara, e Kornfeld (2014) realizaram estudo onde sistemas de compressão de ar de diferentes capacidades e tecnologias de controle são aplicados para diferentes faixas de demanda, operando o sistema de compressão de maneira a se adaptar ao consumo. Os autores observaram nesse estudo uma redução de 70% no consumo de energia. Em sistemas compostos de mais de um compressor de tamanhos diferentes, Kumar (2010) sugere que a estratégia de controle minimize os acionamentos concomitantes, priorizando o acionamento do menor compressor para estabilizar a pressão da linha. O autor ainda recomenda utilizar compressores maiores e de maior vazão para o preenchimento somente nos casos em que o compressor menor não estiver atendendo a demanda.

Para Nehler, Parra e Thollander (2018), itens como a qualidade do ar, pressão de trabalho, regulagem do sistema, uso do ar, energia requerida, recuperação e manutenção de energia, são opções que podem ser trabalhadas para melhorar a eficiência de um sistema de ar comprimido.

Uma abordagem sistemática para aumentar a eficiência energética dos sistemas de ar comprimido consiste em oito etapas, que são: auditoria e análise do sistema; estabelecimento de padrões internos; minimização de perdas; harmonização da produção e consumo; identificação das cargas de pico; automação e integração de equipamentos; manutenção de equipamentos; e monitoramento de desempenho. Essa abordagem pode ser considerada adequada tanto para novas instalações quanto para o processo de melhoria de sistemas de ar comprimido já existentes, que é o caso mais frequentemente encontrado (OLESKO, 2013; SESLIJA et al., 2016).

2.2 MOTORES ELÉTRICOS

Os motores elétricos são responsáveis pela transformação da energia elétrica em energia mecânica, sendo amplamente aplicados e de grande importância nos processos industriais (O'RIELLY; JESWIET, 2014). Sistemas eletromotrizes são responsáveis por aproximadamente 60% do consumo energético em indústrias de manufatura (MCKANE; HASANBEIGI, 2011).

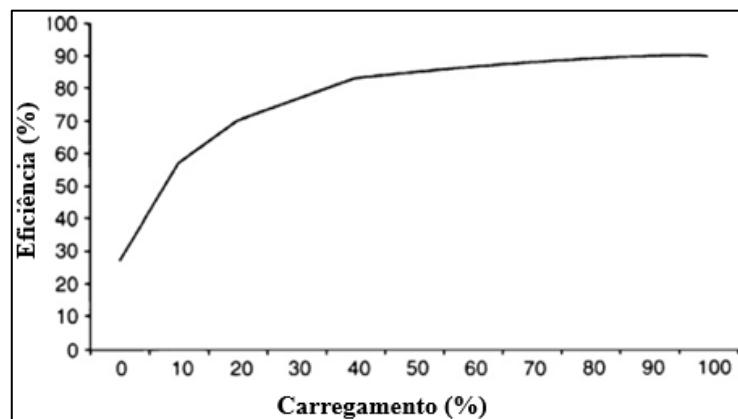
Em 2002, o governo brasileiro, por meio do decreto lei nº 4.508 (BASIL, 2002) instituiu a regulamentação para os motores elétricos, definindo que em 2004 motores e equipamentos com eles equipados deveriam seguir alguns padrões mínimos de rendimento. Motores elétricos possuem uma vida útil de 10 anos ou mais, e embora haja motores elétricos eficientes no

mercado brasileiro e barreiras para inibir a produção de motores novos de baixo rendimento, estes são mais caros, fazendo com que muitas empresas prefiram alternativas de reparo e recondição de motores antigos a comprar novos motores com rendimento maior (SOLA; MOTA; KOVALESKI, 2011).

Diversos autores apontam para os desperdícios energéticos em motores elétricos superdimensionados, indicando que possuem rendimento muito reduzido quando operando abaixo de 50% de sua carga máxima (Figura 6). Para melhor rendimento, sugere-se que os motores sejam dimensionados para operar com cargas de 75% a 80%. (HAN; YUN, 2015; O'RIELLY; JESWIET, 2014).

O subdimensionamento e problemas de refrigeração causados por instalação de motores em áreas enclausuradas, ou falhas na blindagem e dissipadores dos motores também podem causar um excesso de aquecimento, diminuindo a vida útil e o rendimento do motor. É estimado que a cada 10 °C de elevação na temperatura das bobinas de um motor elétrico, a vida útil do mesmo é reduzida pela metade (O'RIELLY; JESWIET, 2014).

Figura 6 – Relação entre o fator de carga do motor e a eficiência



Fonte: adaptado de Saidur (2010).

A idade do motor também é um fator que pode afetar o seu rendimento. Com a publicação do decreto 4.508, de 11 de dezembro de 2002 (BASIL, 2002), instituiu-se o programa de etiquetagem obrigatória de motores elétricos no Brasil, definindo os padrões de rendimento para motores trifásicos do tipo gaiola de esquilo padrão e de alto rendimento, cobrindo aproximadamente 80% dos motores disponíveis no mercado nacional. Os valores mínimos de rendimento instituídos pelo decreto estavam relacionados ao número de polos e potência dos motores, e variavam de 66% a 94,5% para motores do tipo padrão, e de 70% a 95% para os motores de alto rendimento. A portaria interministerial 553/2005 unificou os limites de

rendimento, eliminando a distinção entre motores padrão e de alto rendimento, adotando os valores de rendimento mínimos antes definidos para motores de alto rendimento para todos os motores elétricos. Esta portaria previa um prazo de 4 anos para que os novos índices estabelecidos entrassem em vigor, e estes passaram a ser obrigatórios para motores fabricados no Brasil a partir de 2010 (SAUER *et al.*, 2015).

Os motores elétricos convencionais tendem a ter uma vida útil longa, geralmente superior a 10 anos (SOLA; MOTA; KOVALESKI, 2011). Com base na data de vigência dos padrões de rendimento para motores elétricos, e na durabilidade dos motores, entende-se que grande parte dos motores elétricos atualmente utilizados pela indústria brasileira não apresentam índices de rendimento energético satisfatórios. Contribuindo ainda mais para este cenário, segundo Sauer *et al.* (2015), testes realizados em motores instalados antes de 2010 indicaram que grande parte dos motores não atingia os limites de rendimento mínimos estabelecidos em 2002.

Em muitos casos, quando um motor para de funcionar, a empresa acaba optando pela recuperação do motor no lugar de comprar um motor novo de maior rendimento. A recuperação é conhecida pelo termo “rebobinagem”, e se trata de uma operação onde os filamentos e isolamentos do motor são substituídos, estendendo novamente a vida útil do motor para mais alguns anos, embora o motor recuperado tenha uma grande tendência a apresentar rendimento inferior ao original. (KUMAR, 2010; SOLA; MOTA; KOVALESKI, 2011).

A decisão pela compra de um novo motor ao invés da rebobinagem e recuperação de um motor antigo é relativamente complicada, e depende de variáveis como o custo da recuperação, custo do novo motor de alto rendimento, tamanho e rendimento do motor original, fator de carga, custo da eletricidade e horas anuais de uso. Técnicas adequadas de recuperação de um motor podem minimizar as perdas de rendimento decorrentes do processo de rebobinagem, porém, segundo Sauer *et al.* (2015), tais práticas não são comuns no Brasil, sendo comum uma redução de rendimento entre 1% a 5% devido aos processos utilizados.

Em algumas aplicações industriais, a quantidade de energia mecânica demandada pelo processo sofre significativas variações, o que dificulta a utilização de motores em uma capacidade de carga constante. A utilização de controladores de velocidade, principalmente nestes casos, permite um melhor aproveitamento energético. Um potencial de economia de energia elétrica superior a 30% é estimada pela aplicação de controladores de velocidade em sistemas de ventilação e bombeamento, com retorno do investimento inferior a dois anos (DU PLESSIS; LIEBENBERG; MATHEWS, 2013).

Um dos pontos mais críticos em relação ao consumo de energia em sistemas eletromotrizes é dado pela partida, onde geralmente a aplicação sai do estado de repouso para a realização do trabalho mecânico em um tempo relativamente curto, havendo maior esforço para compensar as grandes cargas inerciais. Algumas aplicações industriais exigem operações intermitentes de motores, exigindo dezenas de partidas diárias. Segundo Kumar (2010) e Ghadimi *et al.* (2014), nos casos em que a carga e a velocidade do motor já estão em padrões ideais, a adição de uma estratégia de partida suave geralmente é uma boa decisão. O uso de um controlador eletrônico de partida, também conhecido por “*soft-starter*”, pode oferecer uma redução no consumo de energia elétrica, além de aumentar a vida útil do motor e dos elementos mecânicos devido à minimização do *stress* inerentes a outros processos de partida (KUMAR, 2010).

Durante um processo de substituição de um motor danificado, outro motor com características diferentes pode ser utilizado. Priorizando a robustez ou a disponibilidade de recursos em processos de manutenção, a substituição de motores por outros de maior potência é uma prática frequente na indústria brasileira. Muitas vezes, a prática visa evitar a interrupção de um processo e deve ter característica provisória, porém, em alguns casos, a substituição provisória passa a ser permanente, levando ao aumento no desperdício de energia pelo superdimensionamento (CNI, 2014).

Conforme Sola (2006), mesmo os motores mais antigos com bom rendimento podem apresentar uma curva de degradação que deve ser analisada em aplicações de uso frequente, e com o aumento no número de horas de funcionamento nota-se um aumento na corrente elétrica demandada pelos motores elétricos. O processo de manutenção permite melhorar o rendimento, entretanto, a degradação continua a existir, o que revela que a manutenção periódica influencia na eficiência energética, além de ratificar a importância dos processos de manutenção preditiva ou preventiva nos equipamentos (SOLA, 2006).

A Lei de Afinidades estabelece que enquanto a vazão do sistema cresce em uma relação proporcional direta à velocidade de uma bomba, ventilador ou de um compressor, a potência demandada pelo sistema cresce a uma proporção geométrica.

Segundo Abdelaziz, Saidur e Mekhilef (2011); Kumar (2010); Moreira (2008), o conjunto de Equações (3) pode ser utilizado para definir a relação teórica entre a vazão, a altura manométrica e a potência necessária em um sistema. Estas equações, conhecidas como Lei de Afinidades, estão a seguir descritas:

$$Q_2 = Q_1 \cdot \left(\frac{V_2}{V_1}\right) \quad p_2 = p_1 \cdot \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^2 \quad P_2 = P_1 \cdot \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^3 \quad (3)$$

onde as vazões volumétricas Q_1 e Q_2 em m^3/min , nas condições operacionais 1 e 2, respectivamente, V_1 e V_2 as velocidades em m^2/s , p_1 e p_2 as pressões manométricas em bar e P_1 e P_2 as potências elétricas em kW.

Segundo Kumar (2010), o uso de controladores de velocidades é o método de controle de fluxo com melhor aproveitamento energético, atingindo uma redução de até 85% da energia quando a vazão do sistema é reduzida à metade.

2.3 ANÁLISE DE INVESTIMENTOS

Segundo Neto (2016), toda operação financeira é representada em termos de fluxos de caixa, ou seja, em fluxos futuros esperados de recebimentos e pagamentos de caixa. A avaliação desses fluxos de caixa consiste, em essência, na comparação dos valores presentes, calculados segundo o regime de juros compostos a partir de uma dada taxa de juros, das saídas e entradas de caixa.

Conforme Damodaran (2002), os recursos das empresas devem ser distribuídos através de decisões de investimento, que podem ser aqueles que criam receitas e lucros, tal como o lançamento de uma nova linha de produtos, ou aqueles que poupam recursos, tal qual a implementação de um sistema de distribuição novo e mais eficiente.

Dentro deste contexto, as ações de eficiência energética em sistemas de ar comprimido irão proporcionar reduções no consumo de energia, que consequentemente reduzirá custos com as faturas de energia.

2.3.1 Taxa interna de retorno (TIR)

A taxa interna de retorno é a taxa de juros (desconto) que iguala, numa única data, os fluxos de entrada e saída de caixa produzidos por uma operação financeira (NETO, 2016). Indica que a taxa de viabilidade de um projeto não depende do mercado de capitais, e sim dos fluxos de caixa do referido projeto (ROSS *et al.*, 2002). A TIR pode ser obtida através da Equação (4).

$$FC_0 = \sum_{j=1}^n \frac{FC_j}{(1+i)^j} \quad (4)$$

onde FC_0 é o valor do fluxo de caixa no momento zero, FC_j são os fluxos previstos de entradas ou saídas de caixa em cada período do tempo e i é a taxa de desconto que iguala, em determinada data, as entradas com as saídas previstas de caixa. Em outras palavras, i representa a taxa interna de retorno.

2.3.2 Período de *Payback time*

O período de *payback* consiste na determinação do tempo necessário para que o valor do investimento de capital seja recuperado por meio de benefícios incrementais líquidos (fluxo de caixa), que são promovidos pelo investimento (NETO, 2009).

Segundo Kassai *et al.* (2000), o *payback time*, o qual consiste na identificação do prazo em que o montante de capital investido em um determinado projeto, é o período de recuperação de um investimento, por meio de fluxos líquidos de caixa e gerados por tal investimento.

Conforme Ross *et al.* (2002) e Kassai *et al.* (2000), para o cálculo do período de *payback*, são utilizadas, normalmente, duas metodologias, sendo que a primeira delas, é conhecida como *payback* simples. Neste método, o prazo de recuperação do capital é encontrado somando-se os valores dos fluxos de caixa negativos com os valores dos fluxos de caixa positivos, até o momento em que essa soma resulta em zero. O segundo método, conhecido como *payback* descontado, considera os valores dos fluxos de caixa, descontando os valores da taxa mínima de atratividade² (TMA), de forma a verificar o prazo de recuperação do capital investido, proporcionando uma análise mais elaborada do tempo de retorno do investimento.

² Taxa de atratividade econômica do projeto, definida previamente pela empresa.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O estudo da eficiência energética em sistemas de ar comprimido foi realizado através da avaliação do sistema de geração, armazenamento e distribuição em três instalações distintas, sendo que cada instalação possui configuração de equipamentos específica para atender a demanda de ar comprimido das mesmas.

3.1 CARACTERIZAÇÃO DAS INSTALAÇÕES AVALIADAS

A caracterização das instalações é relatada nas seções seguintes.

3.1.1 Primeira instalação

A primeira instalação (01), onde o sistema de ar comprimido foi avaliado, é uma indústria metalmeccânica e que realiza processo de metalização e pintura em peças de diversos modelos. O regime de trabalho da empresa é de 12h diárias. O parque fabril possui uma idade de mais de 23 anos, sendo que o sistema de ar comprimido a ser avaliado está instalado a mais de 10 anos.

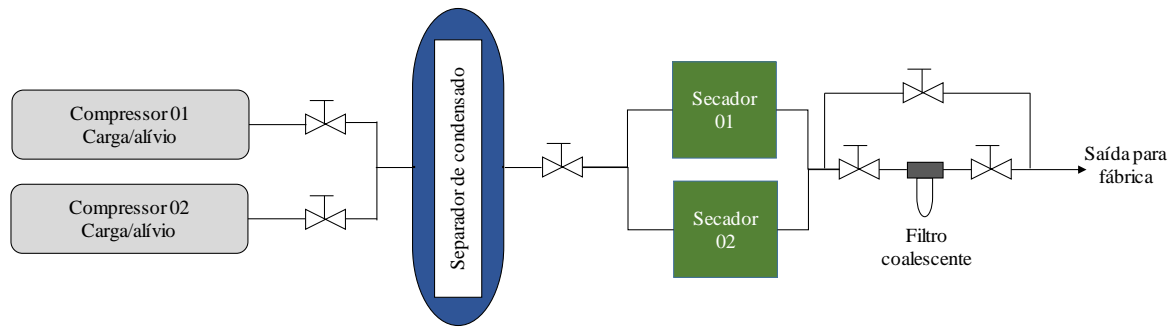
Esta instalação consome em média 52,3 MWh/mês de energia elétrica correspondendo a um gasto de aproximadamente R\$ 29.000,00 por mês (1.484,47 UPF³). O sistema de ar comprimido representa cerca de 10,3% do consumo geral de energia da instalação, consumindo cerca de 5,4 MWh/mês de energia elétrica, gerando um custo de aproximadamente R\$ 3.000,00 por mês (153,57 UPF).

A primeira instalação é composta por dois compressores rotativos com rotação fixa, um separador de condensado e dois secadores de ar, conforme mostrado na Figura 7. Na linha de ar comprimido da instalação 01, logo após a saída dos compressores, a mesma possui um separador de condensado, com capacidade de armazenamento de 0,35 m³, este separador de condensado possui uma válvula de esfera na parte inferior para expurgar o condensado acumulado, sendo a purga realizada manualmente. Na sequência, o ar que sai do separador de condensado, passa por um secador por refrigeração, sendo enviado para os usuários finais de maneira que a umidade contida na tubulação seja aceitável. O ar é distribuído através de uma

³ UPF – Unidade de padrão fiscal serve como indexador para corrigir taxas e tributos cobrados pelo estado do Rio Grande do Sul, tendo seu valor atualizado anualmente pela receita estadual.

rede principal em configuração em anel, contendo os ramais de descidas de ar para os equipamentos consumidores. Na Tabela 1 são apresentadas as especificações dos compressores de ar que operam na instalação 01 analisada.

Figura 7 – Esquema representativo da instalação 01



Fonte: Autor (2019).

Tabela 1 - Especificações dos compressores da instalação 01

Compressor 01		Compressor 02	
Marca	Chicago Pneumatic	Marca	Schulz
Modelo	CPA 15	Modelo	SRP 2025
Tipo	Carga/Alívio	Tipo	Carga/Alívio
Pressão de trabalho	10 bar	Pressão de trabalho	10 bar
Potência do motor	11,18 kW (15 hp)	Potência do motor	18,64 kW (25 hp)
Descarga livre efetiva	1,444 Nm ³ */min	Descarga livre efetiva	2,831 Nm ³ /min

*Nm³: Normal m³ - medida de volume nas condições normais de temperatura e pressão.

Fonte: Autor (2019).

Os equipamentos que utilizam ar comprimido na instalação 01 têm a necessidade de serem abastecidos com pressão manométrica de trabalho mínima de 6 bar (dados extraídos dos catálogos dos equipamentos), sendo que os principais consumidores são equipamentos de metalização a vácuo e cabines de pintura.

3.1.2 Segunda instalação

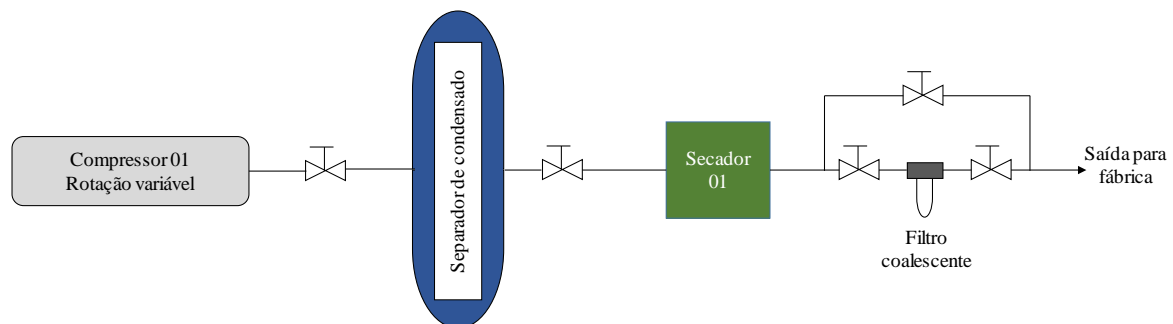
A segunda instalação (02), onde o sistema de ar comprimido foi avaliado, é uma planta fabril que contém processo de injeção de plásticos e montagem de componentes elétricos para veículos automotores. Esta planta foi inaugurada em 2011, sendo que este sistema de

compressão de ar está em operação desde o início. O regime de operação do sistema de ar comprimido da planta é de 24 horas diárias, sendo desligado somente nos finais de semana.

A instalação consome em média 118,2 MWh/mês de energia elétrica correspondendo a um gasto de aproximadamente R\$ 55.673,00 por mês (2.849,82 UPF). O sistema de ar comprimido representa cerca de 4% do consumo geral de energia da instalação, consumindo aproximadamente 4,6 MWh/mês de energia elétrica, gerando um custo de aproximadamente R\$ 3.100,00 por mês (158,68 UPF).

A segunda instalação é composta por um compressor rotativo com velocidade variável, um separador de condensado e de um secador de ar, representado na Figura 8. Logo após o compressor a instalação possui um separador de condensado com volume interno de 0,5 m³. Na sequência, um secador de ar por refrigeração com uma vazão efetiva de 3,681 Nm³/min, é necessário para garantir o fornecimento de ar comprimido com uma concentração de umidade reduzida. O ar é distribuído através de uma rede principal em configuração em anel, com características semelhantes da instalação 01. Na Tabela 2 são mostradas as características do compressor utilizado para atender a demanda de ar comprimido da segunda instalação.

Figura 8 – Esquema representativo da instalação 02



Fonte: Autor (2019).

Tabela 2 - Especificações do compressor da instalação 02

Compressor 01	
Marca	Schulz
Modelo	SRP 3030FAC
Tipo	Velocidade variável
Pressão de trabalho	7,5 bar
Potência do motor	22,37 kW (30 hp)
Descarga livre efetiva	3,511 Nm ³ /min

Fonte: Autor (2019).

Os equipamentos que utilizam o ar comprimido na instalação 02 têm necessidade de serem abastecidos com uma pressão manométrica de trabalho mínima de 6 bar, exceto um equipamento aplicador de cola, que necessita de uma pressão de 7 bar. Os principais consumidores da instalação 02 são máquinas injetoras, máquinas de usinagem, dispositivos personalizados e ferramentas manuais.

3.1.3 Terceira instalação

A terceira instalação (03), onde o sistema de ar comprimido foi avaliado, é uma planta fabril voltada inteiramente para usinagem de peças. Esta planta foi inaugurada em 2008, sendo que este sistema de compressão de ar, na configuração apresentada, está em operação a aproximadamente 2 anos. O regime de operação do sistema de ar comprimido da planta é de 24 horas diárias, sendo desligado somente nos finais de semana.

Esta instalação consome em média 162,95 MWh/mês de energia elétrica correspondendo a um gasto de aproximadamente R\$ 75.000,00 por mês (3.839,14 UPF). O sistema de ar comprimido representa cerca de 50,2% do consumo geral de energia da instalação, consumindo aproximadamente 81,8 MWh/mês de energia elétrica, gerando um custo de aproximadamente R\$ 37.650,00 por mês (1.927,25 UPF).

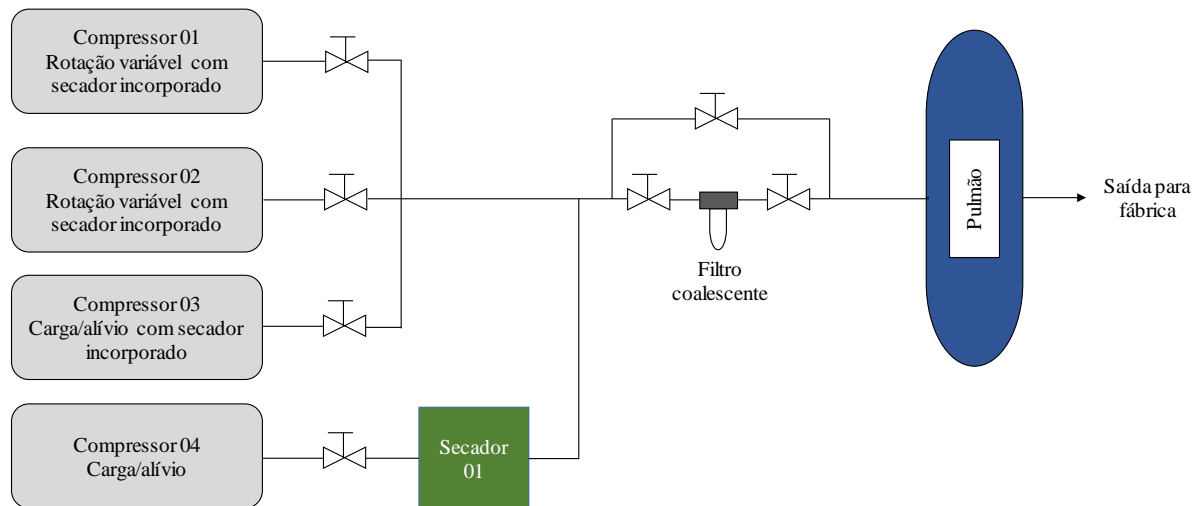
A terceira instalação é composta por quatro compressores, sendo dois destes com velocidade variável e dois compressores com rotação fixa sendo que três compressores já possuem secador incorporado, e um conta com um secador de ar. A instalação também contém um tanque pulmão, com a função de acumular o ar comprimido gerado pelos compressores. A Figura 9 mostra um esquema representativo da instalação.

Após os compressores a instalação é dotada de um separador de condensado com volume interno de 0,35 m³. Quando o quarto compressor, com vazão efetiva de 3,392 Nm³/min, é acionado é necessário o uso de um secador de ar por refrigeração que está instalado após o mesmo e antes do separador de condensado. Na Tabela 3 são apresentadas as características dos compressores da instalação 03.

Depois do secador a instalação possui a rede de ar, distribuída através de uma rede principal em configuração de anel fechado, com as baixadas de ar para os equipamentos consumidores. Esses equipamentos são centros de usinagem, tornos CNC's e dispositivos pneumáticos personalizados. Em verificação nos catálogos dos equipamentos, foi evidenciado

que a pressão manométrica de trabalho mínima requerida para todos os equipamentos é de 6 bar.

Figura 9 – Esquema representativo da instalação 03



Fonte: Autor (2019).

Tabela 3 - Especificações do compressor da instalação 03

Compressor 01		Compressor 02	
Marca	Ingersoll Rand	Marca	Ingersoll Rand
Modelo	R75N - A	Modelo	IRN100H - CC
Tipo	Velocidade variável	Tipo	Velocidade variável
Pressão de trabalho	10 bar	Pressão de trabalho	10 bar
Potência do motor	74,57 kW (100 hp)	Potência do motor	74,57 kW (100 hp)
Descarga livre efetiva	15,563 Nm ³ /min	Descarga livre efetiva	15,563 Nm ³ /min
Compressor 03		Compressor 04	
Marca	Atlas Copco	Marca	Atlas Copco
Modelo	GA37FF	Modelo	GA22FF
Tipo	Carga/Alívio	Tipo	Carga/Alívio
Pressão de trabalho	7,4 bar	Pressão de trabalho	7,5 bar
Potência do motor	37,28 kW (50 hp)	Potência do motor	18,64 kW (25 hp)
Descarga livre efetiva	6,966 Nm ³ /min	Descarga livre efetiva	3,392 N/m ³ /min

Fonte: Autor (2019).

3.2 INSTRUMENTAÇÃO

Para realizar o levantamento de informações referente ao consumo de energia nos sistemas de ar comprimido, assim como para a coleta das pressões manométricas, temperatura e umidade foram utilizados os equipamentos da Tabela 4.

Tabela 4 - Equipamentos para medição

Instrumento	Marca	Modelo	Precisão
Analizador de qualidade de energia	Fluke	435 serie II	0,1 Ampere
Analizador de qualidade de energia	Minipa	ET-5051C	0,1 Ampere
Analizador de qualidade de energia	Embrasul	RE7000	0,1 Ampere
Analizador de energia	EXTECH	382090	0,1 Ampere
Manômetro	Festo	359873K8	0,2 bar
Termo-higrômetro	Minipa	MT-241A	$\pm 1^{\circ}\text{C}/\pm 5\%$

Fonte: Autor (2019).

Os quatro analisadores mencionados na Tabela 4 foram avaliados realizando a mesma medida para uma faixa pré-definida de potência. No Apêndice A reporta-se a totalidade dos dados medidos, onde o desvio padrão médio foi 225,24 Watts, na faixa de medição de 4.000 W a 7.500 W, fator que demonstra a possibilidade de usa-los simultaneamente na medição de energia em diferentes pontos da instalação.

As coletas de informações de tempos foram tomadas através de cronômetros convencionais e também em cronômetros contidos em *smartphones*.

3.3 MÉTODO PROPOSTO PARA VERIFICAÇÃO DOS DESPÉRDÍCIOS DE ENERGIA NOS SISTEMAS DE AR COMPRIMIDO

O início da verificação do potencial de redução do consumo de energia através da eliminação de desperdícios nos sistemas de ar comprimido foi realizado através da instalação de um ou mais equipamentos de medição de energia (analisador de energia), coletando grandezas elétricas como tensão, corrente, potência, entre outras, informações estas registradas de minuto a minuto durante um período mínimo de sete dias (uma semana). Os analisadores de energia fazem leituras a cada 200 ms, e a informação do minuto coletado é uma média dos valores lidos durante este tempo. Após as informações coletadas, foram gerados gráficos da potência ativa total solicitada pelos sistemas, nestes gráficos foi possível verificar padrões de

consumo, picos de demanda de ar, além de anomalias provenientes do fornecimento de energia e também anomalias dos próprios equipamentos. Em posse destes perfis de consumo, foram realizadas medições de pressão manométrica em pelo menos três pontos da instalação: início da distribuição; meio; e ponto mais afastado; a fim de detectar perda de carga na rede. Uma forma de avaliar se a perda de carga está em um nível admissível, foi criado um indicador para mensurar a perda de carga, cuja forma de calcular é representada pela Equação 5.

$$\Delta p_c \geq \frac{p_{af}}{p_f} \quad (5)$$

onde, Δp_c é o índice de perda de carga, que não deve ser menor do que 0,9 para ser considerado aceitável, p_{af} é a pressão manométrica medida no ponto mais afastado da rede e p_f é a pressão de fornecimento do sistema de compressão de ar.

Outra verificação realizada é em relação ao valor de pressão de fornecimento de ar comprimido em relação ao(s) equipamento(s) que possui a necessidade da maior pressão de fornecimento, para avaliar a possibilidade de redução da pressão da rede de ar comprimido. Assim como para avaliar a perda de carga, outro fator foi criado a fim de evidenciar uma relação adequada entre a pressão de consumo requerida e a pressão de fornecimento do sistema, como é visto na Equação 6.

$$\Delta p_f \geq \frac{p_{rq}}{p_f} \quad (6)$$

onde, Δp_f é o índice da pressão de fornecimento, que não deve ser menor do que 0,85 para ser considerado aceitável, p_{rq} é a menor pressão manométrica requerida pelos equipamentos e p_f é a pressão de fornecimento do sistema de compressão de ar.

Para a verificação do nível de vazamentos da rede de ar foram utilizados dois métodos de avaliação, sendo o primeiro método dado pela avaliação dos tempos conforme equações 1 e 2 e aplicável à compressores do tipo carga/alívio, como os da primeira instalação. Na segunda e na terceira instalação, por possuírem compressores de rotação variável, a forma utilizada para medir o índice de vazamentos foi através da avaliação da curva de potência ativa. Essa foi medida durante um período de tempo mínimo de 10 minutos em que nenhum equipamento

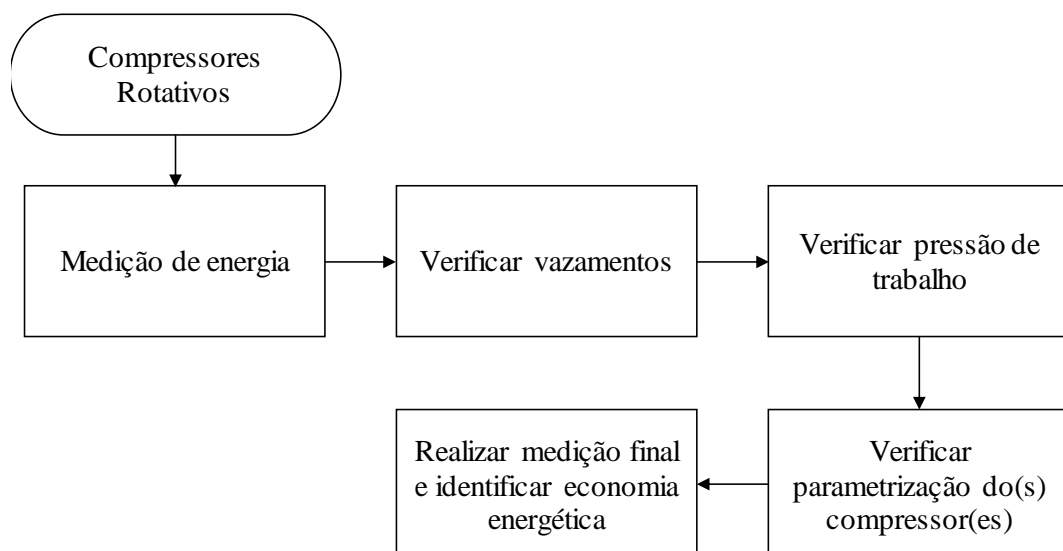
consumidor de ar comprimido estava em operação. Assim foi detectado a potência ativa necessária para suprir os vazamentos.

3.4 FLUXOGRAMA DO MÉTODO PROPOSTO

O estudo para a elaboração de uma metodologia para o cálculo da eficiência global em sistemas de ar comprimido requer avaliações em torno das variáveis do sistema. Com base nas medições realizadas foi possível montar um diagnóstico dos desperdícios de energia com as suas respectivas oportunidades de redução de consumo. Este diagnóstico também aborda um plano, pontuando as ações específicas a serem realizadas a fim de atingir o melhor índice de eficiência dos sistemas. O diagnóstico também possui uma projeção da redução de custo com energia. Os valores de redução de consumo e redução de custo são baseados em cálculos individualizados para cada ação.

A Figura 10 mostra um fluxograma resumido da metodologia proposta e o fluxograma completo é apresentado no Apêndice B, no qual são identificadas todas as informações envolvidas.

Figura 10 – Fluxograma resumido



Fonte: Autor (2019).

A proposta para este trabalho é a criação de uma metodologia que possibilite evidenciar um valor global das reduções de consumo e redução de custo nos sistemas de ar comprimido avaliados.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são detalhados os resultados obtidos aplicando a metodologia mostrada no fluxograma proposto na seção 3.3 e no Apêndice B.

4.1 DETERMINAÇÃO DAS OPORTUNIDADES DE EFICIENTIZAÇÃO DO SISTEMA DE AR COMPRIMIDO NA PRIMEIRA INSTALAÇÃO

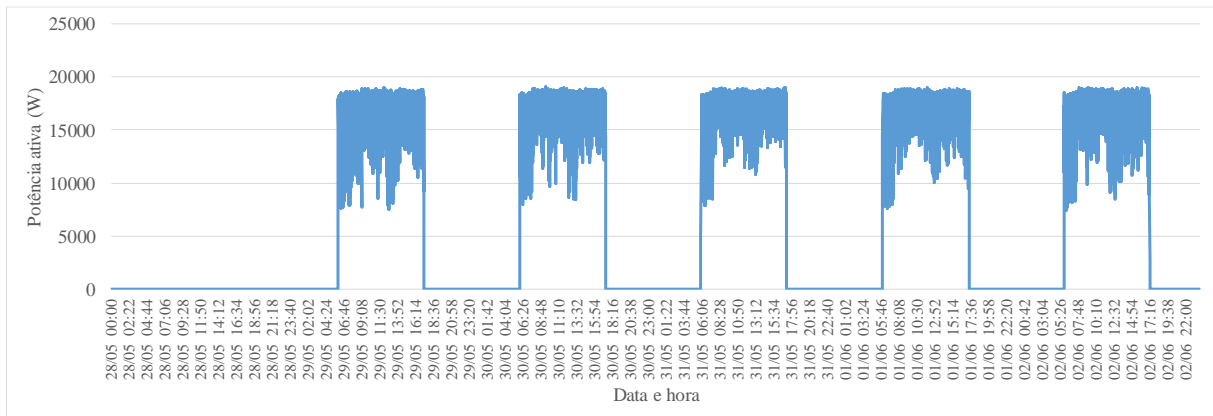
As oportunidades de efficientização encontradas na primeira instalação avaliada, são mostradas na mesma sequência que o fluxo da Figura 10 e no apêndice B, sendo detalhados nos tópicos a seguir. Após as análises é apresentado um diagnóstico juntamente com ações propostas para melhorar a eficiência do sistema de ar comprimido.

4.1.1 Potências elétricas requeridas pelos compressores de ar comprimido

Utilizando analisadores de energia, e registrando os valores de potência ativa requerida pelos compressores a intervalos de um minuto, foram obtidos os gráficos da Figura 11 e Figura 12. Na Figura 11 é mostrada a curva de potência do compressor 02, que opera em ciclos de carga e alívio durante o turno de trabalho, sendo que nos intervalos entre os turnos este é desligado. Na Figura 12 é mostrada a curva de potência do compressor 01. Neste caso fica evidenciado o desperdício de energia, pois o compressor é acionado no início do turno de trabalho, mas logo em seguida entra em alívio, permanecendo assim durante todo o período de trabalho, sendo desligado no final do turno.

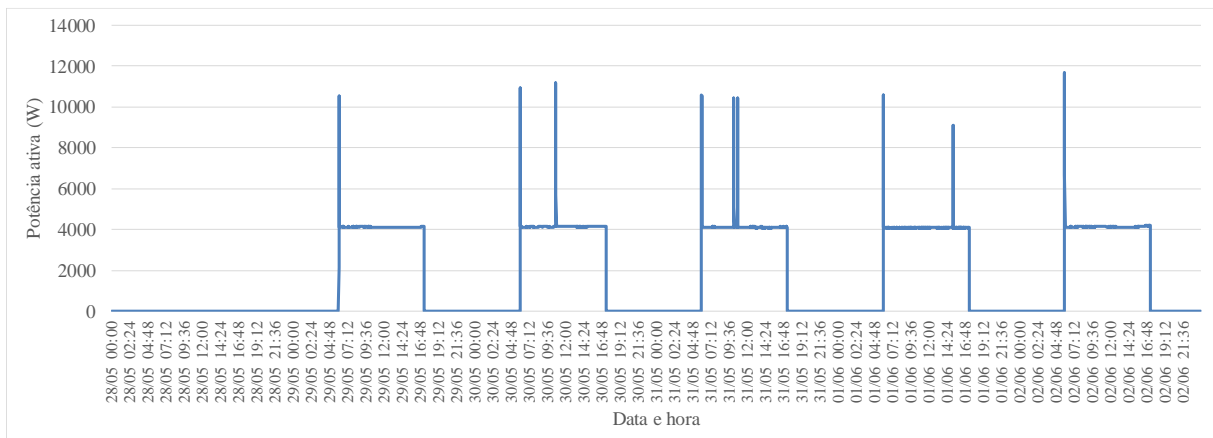
Em alguns momentos percebe-se picos onde o mesmo entra em carga, sendo que nestes casos isto ocorre devido a utilização indevida de ar comprimido como limpeza do piso, limpeza pessoal, entre outros. Isso acontece porque não é percebido um padrão nestes ciclos e também, em verificação junto aos equipamentos que utilizam ar comprimido não foi encontrado nenhum que se utiliza de uma demanda instantânea de ar comprimido conforme visto neste gráfico.

Figura 11 – Gráfico de potência requerida pelo compressor 02 de 25 hp



Fonte: Autor (2019).

Figura 12 - Gráfico da potência requerida do compressor 01 de 15 hp

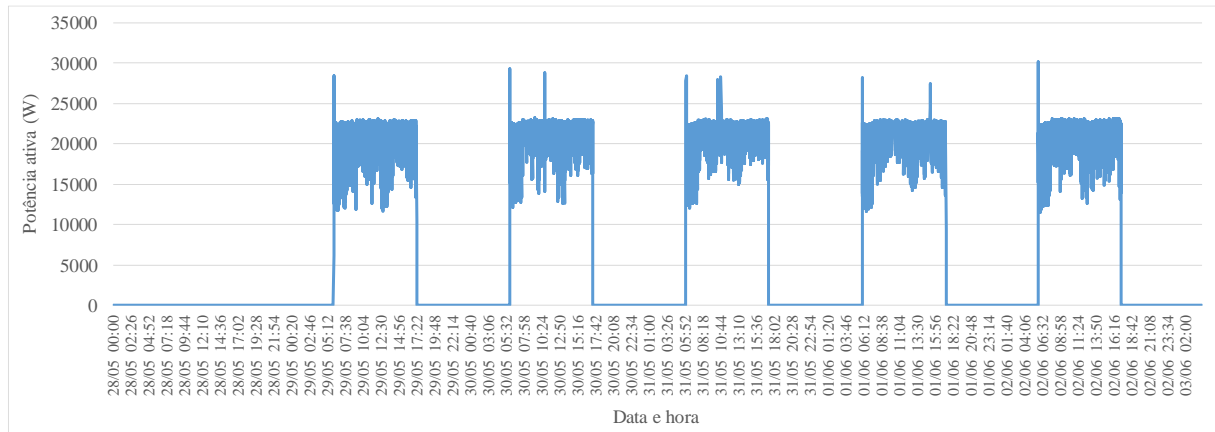


Fonte: Autor (2019).

A Figura 13 mostra o gráfico da potência total requerida pelo sistema de ar comprimido da instalação 01. Neste gráfico o desperdício de energia devido ao compressor 01 ficar ligado em estado de alívio mostra o quanto a instalação está desperdiçando energia. Ou seja, o compressor em questão não produz ar comprimido para a planta e apenas eleva o consumo de potência ativa.

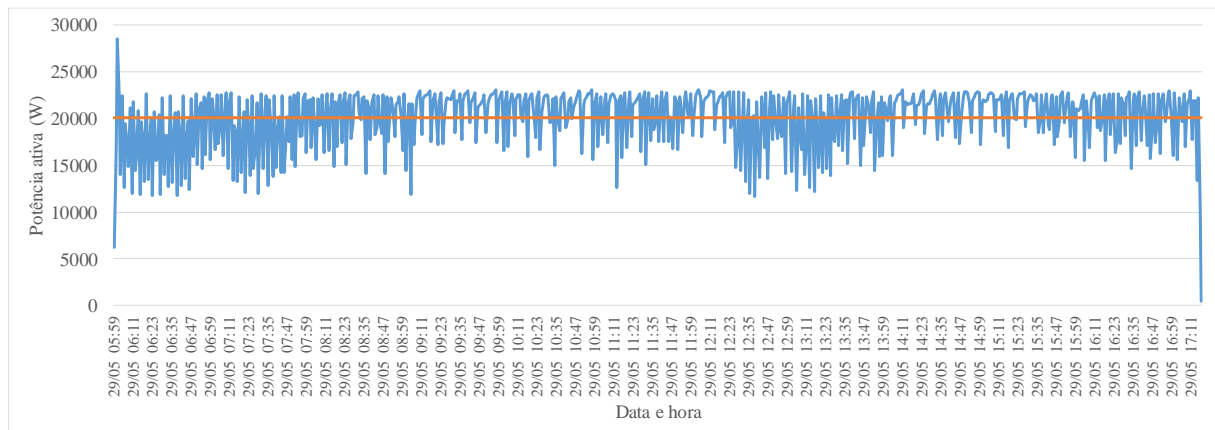
Como forma de mensurar uma média de potência total consumida foi destacada as medições durante o turno de trabalho do dia 29/05/2017, conforme mostrado na Figura 14. No gráfico foi traçada a média da potência consumida neste turno de trabalho, onde atingiu um patamar de 20,09 kW, caracterizando assim uma média de potência do sistema antes de realizar qualquer ação de redução de consumo da instalação 01.

Figura 13 – Gráfico da potência total requerida pelo sistema de ar comprimido da instalação 01



Fonte: Autor (2019).

Figura 14 – Gráfico da potência ativa total no dia 29/05/2017 do sistema de ar comprimido da instalação 01



Fonte: Autor (2019).

4.1.2 Índice de vazamentos de ar comprimido

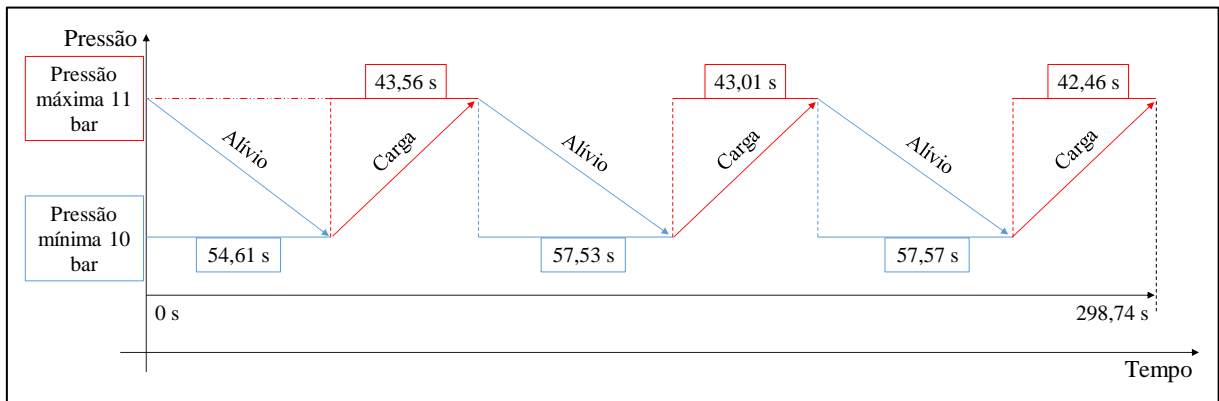
Outra avaliação realizada foi a obtenção do percentual de vazamento da rede de ar interna da empresa. O ensaio para medir este percentual ocorreu conforme os passos abaixo:

- Passo 01 – desligar os compressores até a rede de ar esvaziar.
- Passo 02 – ligar apenas o compressor 02 de 25 hp, pois, aparentemente, é somente esse compressor que abastece de ar comprimido a instalação.
- Passo 03 – aguardar até o compressor entrar em alívio e, a partir deste instante, é iniciada a contagem do tempo.

- Passo 04 – registrar o tempo até o compressor entrar em alívio novamente.

Neste caso foram anotados 3 ciclos, pois verificou-se que os tempos estabilizaram nestas condições. A Figura 15 mostra como foi a tomada de tempo.

Figura 15 – Ensaio para medir vazamentos



Fonte: Autor (2019).

Com os tempos medidos chega-se aos valores entre os estados de carga (t_c) de 129,03 segundos (2,1505 minutos) e alívio (t_a) de 169,71 segundos (2,8285 minutos). Substituindo os valores medidos na equação (2), sabendo que a vazão nominal do compressor 2 é de 2,831 Nm³/min, determina-se o volume de vazamento:

$$VV = \frac{2,831 \cdot 2,1505}{(2,1505 + 2,8285)} = 1,22 \frac{Nm^3}{min}$$

O volume de vazamento calculado corresponde a um percentual de vazamentos de ar comprimido na instalação de 43,2%.

4.1.3 Parametrização dos compressores e pressão de trabalho

Inicialmente, a fim de detectar qual a mínima pressão manométrica de trabalho requerida pela planta fabril, foi obtido dos catálogos dos equipamentos consumidores a pressão mínima do ar comprimido de 6 bar. E para atender esta demanda de ar, os dois compressores estavam ligados em paralelo ao sistema e configurados para gerar ar comprimido dentro de uma faixa de pressão de 10 a 11 bar.

Na sequência foi realizada a medição da pressão de trabalho com um manômetro em três pontos diferentes da rede, sendo o primeiro ponto de medição junto ao primeiro equipamento consumidor de ar comprimido, localizado a 2 metros da sala dos compressores. O segundo ponto medido, localiza-se a 10 metros da sala dos compressores, já a terceira medição está a uma distância de 40 metros da sala dos compressores. Nesta verificação foi avaliado que a perda de carga é de 2 bar, entre a geração do ar comprimido até o primeiro ponto de medição, ou seja, comprimindo o ar a 11 bar, a pressão na fábrica chega a 9 bar no 1º ponto, antes do ar ser disponibilizado para os equipamentos, a pressão é regulada à uma pressão de trabalho de 6 bar.

A utilização das equações 5 e 6 é realizada neste momento, a fim de avaliar as oportunidades encontradas tanto na perda de carga (equação (5)) quanto na pressão de fornecimento (equação (6)). Substituindo os valores de p_{af} que é de 9 bar, p_{rq} que é de 6 bar e de p_f que é de 11 bar, encontramos os valores a seguir.

$$\Delta p_c = \frac{p_{af}}{p_f} = \frac{9}{11} \cong 0,82$$

$$\Delta p_f = \frac{p_{rq}}{p_f} = \frac{6}{11} \cong 0,55$$

Os valores encontrados mostram oportunidade para correção na perda de carga pois o indicador calculado ficou em 0,82 abaixo do valor indicado que é 0,9. Nesse caso também evidenciou oportunidade para que a pressão de fornecimento seja reduzida, pois o indicador calculado foi de 0,55, menor do que o especificado que é 0,85. As atuações nesses pontos visam melhorar a eficiência energética do sistema de ar comprimido da instalação 01.

4.1.4 Diagnóstico

Considerando os dados levantados nos itens 4.1.1, 4.1.2 e 4.1.3 tem-se a oportunidade de efficientização nos tópicos abaixo:

- Redução da pressão de trabalho.
- Diminuição da perda de carga.
- Redução de vazamentos.
- Parametrização dos compressores.

Com a redução da pressão de trabalho, os compressores trabalham com menor potência elétrica para geração de ar. Diminuindo a perda de carga, a vazão gerada pela compressão de ar não sofre perdas significativas no percurso até chegar no consumidor final, reduzindo o consumo energético do sistema de compressão de ar. Com a redução no número de vazamentos, a quantidade de ar gerada para suprir a demanda de ar comprimido das máquina e equipamentos foi reduzida, evitando todo o trabalho de geração a mais que está sendo eliminado para o ambiente gerando apenas consumo desnecessário de energia. Com a parametrização adequada das pressões de trabalho dos compressores, a economia é dada pela possibilidade de utilização otimizada dos mesmos, não necessitando que ambos trabalhem ao mesmo tempo sem que tenha necessidade real de fornecer a vazão total para o sistema.

4.1.5 Ações sugeridas para redução do consumo de energia

Conforme mostrado em tópicos no item 4.1.4, são necessárias uma série de ações para atingir-se resultados de economia de energia no sistema de ar comprimido.

4.1.5.1 Pressão de trabalho e parametrização dos compressores

Nos tópicos de redução da pressão de trabalho juntamente com a de parametrização dos compressores, as ações sugeridas são: redução da pressão de trabalho na relação de carga e alívio, e deixar os compressores operando em modo cascata, a Tabela 5 mostra a configuração atual dos compressores da instalação 01. Como já mencionado no item 4.1.1 os dois compressores estavam parametrizados com a mesma faixa de pressão de trabalho. Quanto ao tempo de alívio, que é o tempo em que o compressor permanece em alívio antes de desligar por não reduzir a pressão do sistema, os dois compressores estavam com erros na instalação e na configuração. Ou seja, no compressor 01 este tempo estava configurado no painel de controle em 0 minutos, não desligando por tempo em alívio. Já a configuração deste tempo no compressor 02 é realizada através de um relé temporizador, sendo observado no painel de comando, uma ponte elétrica no relé que comandaria a parada do motor por tempo de alívio, porém, o sinal não estava sendo enviado corretamente, não desligando o compressor.

Tabela 5 – Configuração atual dos compressores da instalação 01

Configuração atual		
Item	Compressor 01	Compressor 02
Pressão carga	10 bar	10 bar
Pressão alívio	11 bar	11 bar
Tempo em alívio	N/A	N/A

Fonte: Autor (2019).

A sugestão de configuração para o sistema é mostrada na Tabela 6, onde se tem redução na pressão de trabalho, configuração em modo cascata e tempos em alívio. Com esta configuração é estimada a redução da pressão manométrica de 11 para 9,8 bar, e sabendo que conforme literatura, a cada bar manométrico reduzido tem-se uma redução no consumo de energia na faixa de 7%, estima-se uma redução total de 8,4%. Com este percentual, pode-se projetar que a potência média do sistema passará de 20,09 kW para um novo valor médio de 18,41 kW, uma diferença de 1,68 kW.

Tabela 6 – Sugestão de configuração da instalação 01

Sugestão de configuração		
Item	Compressor 01	Compressor 02
Pressão carga	8,5 bar	9 bar
Pressão alívio	9,2 bar	9,8 bar
Tempo em alívio	6 minutos	5 minutos

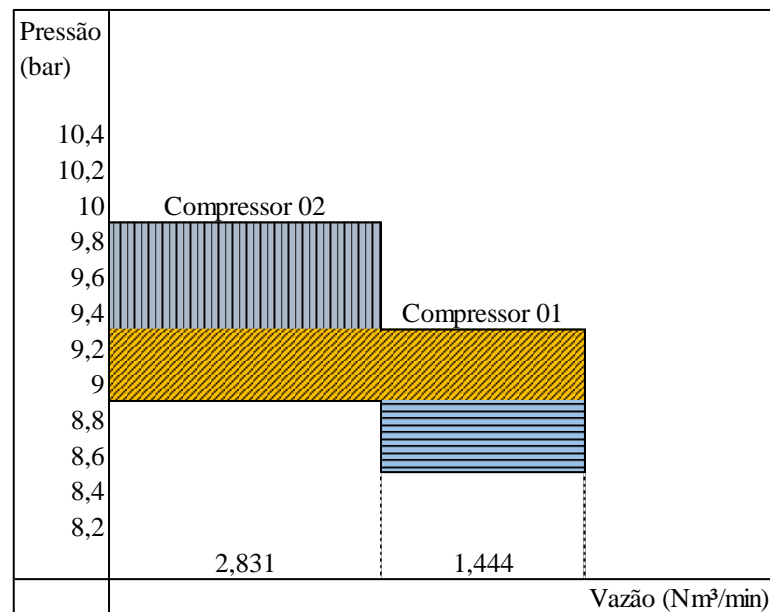
Fonte: Autor (2019).

As sugestões de configuração dos tempos em alívio ficaram diferentes devido às características de cada equipamento, onde no compressor 01 esta configuração é realizada de forma a contabilizar o número máximo de partidas por hora admitidas pelo motor do compressor. A sugestão foi configurar este valor em 10 (número máximo configurável no controlador), gerando um tempo de no máximo 6 minutos até o desligamento. Como a configuração deste tempo no compressor 02 é realizada diretamente no relé temporizador, foi ajustado este tempo em 5 minutos, além de eliminar a ponte que impossibilitava que o compressor desligasse após este tempo.

A configuração em modo cascata é ilustrada na Figura 16, esta configuração faz com que o compressor 01, configurado em uma faixa de pressão menor que o compressor 02, seja ligado apenas no caso em que mesmo com o compressor 02 em carga a pressão da rede diminua a um nível de pressão manométrica de 8,5 bar. Quando esta pressão manométrica atingir o valor de

9,2 bar, o compressor 01 entra em alívio. Se a pressão de trabalho não reduzir novamente até a pressão manométrica de 8,5 bar, o mesmo permanecerá em alívio durante 6 minutos e após esse tempo irá desligar, fazendo com que apenas o compressor 02 permaneça ligado fornecendo ar comprimido para a instalação. Nesta sugestão de configuração, o compressor 02 ficará configurado para atender o consumo base da instalação, quando esta necessitar de vazão de ar maior, o compressor 01 entra em operação para suprir esta necessidade.

Figura 16 – Configuração dos compressores em cascata



Fonte: Autor (2019).

Não é possível estimar uma redução no consumo de energia realizando a programação das pressões manométricas de trabalho nos compressores de ar, devido ao fato de que o funcionamento do compressor 01 fica dependente da demanda de ar que a planta necessita, e como este consumo não é constante qualquer valor estimado neste tópico não estará correto.

4.1.5.2 Perda de carga do sistema

Com relação à diminuição da perda de carga, foi verificado que ela estava ocorrendo junto aos secadores de ar, pois nas medições realizadas foi evidenciado que a queda de pressão manométrica medida ocorria, a um nível significativo, apenas entre o filtro separador de condensado e o primeiro ponto de medição da perda de carga, sendo esta perda de 2 bar. Entre

os pontos 2 e 3 de medição de perda de carga foram encontradas diferenças menores do que 0,3 bar.

A instalação 01 possui dois secadores de ar por refrigeração interligados em paralelo, utilizando a mesma conexão de ar na entrada e na saída, assim como compartilhando os filtros coalescentes⁴ e filtros de partículas tanto na entrada quanto na saída de ar dos secadores.

Como forma de avaliar pontos para reduzir a perda de carga gerada no trecho inicial da instalação foram analisadas as conexões de entrada e saída de ar comprimido, assim como avaliado as condições dos filtros instalados. Foi constatado que as dimensões das conexões estavam incorretas além de muitas conexões entre curvas, luvas, adaptadores e reduções instaladas tanto na entrada dos secadores quanto depois dos secadores. Em avaliação foram verificados que os filtros estavam de acordo com a vazão total do sistema, não sendo encontradas divergências também nas datas de troca sugeridas pelos fabricantes.

A sugestão neste caso foi a realização de uma atualização na rede de ar comprimido compreendida entre o filtro separador de condensado e os secadores, e entre os secadores e o primeiro ponto de consumo da instalação. No tópico de redução da perda de carga, a redução do consumo de energia é estimada juntamente com a redução da pressão de trabalho.

4.1.5.3 Redução de vazamentos

Relativo à redução de vazamentos a ação sugerida foi a de realizar uma verificação dos pontos de vazamentos sem a utilização de equipamentos de detecção, ou seja, apenas os vazamentos audíveis.

Através da medição inicial, cujo índice de vazamento é de 43,2%, pode-se calcular que a potência necessária para os vazamentos era de 8,05 kW, valor encontrado a partir da multiplicação da potência nominal do compressor 02 (onde foi realizado o ensaio) que é de 18,64 kW (25 hp) com o índice de vazamento. Fazendo uma projeção para a redução de vazamento de 43,2% para um valor indicado pela literatura de 10%, valor esse dito como “aceitável”, obtém-se uma projeção do consumo de potência para vazamentos na ordem de 1,86 kW, ou seja, uma redução de 6,19 kW somente em vazamentos.

⁴ Filtros utilizados para retirar impurezas e particulados do ar comprimido.

A soma das ações sugeridas (redução de vazamentos e alteração da pressão de trabalho) geraria um valor total de redução na faixa de 7,87 kW na potência média, reduzindo de 20,09 kW para 12,22 kW, uma relação de redução total de 39,2%.

4.1.6 Ações realizadas e resultados finais

Como forma de priorizar os esforços na realização das ações sugeridas, estas foram executadas em sequência, sendo que uma ação só é realizada quando a ação anterior foi finalizada.

4.1.6.1 Redução de Vazamentos

A primeira ação realizada foi a de redução de vazamentos. Nesta primeira ação foram encontrados diversos pontos de vazamento de ar comprimido, sendo que os principais estavam em pontos de conexões de engate rápido, mangueiras flexíveis com furos e/ou rasgos, unidades de lubrificação e limpeza do ar (lubrifils) entre outros pontos.

Após a correção dos pontos de vazamento, foi novamente realizado o ensaio para a verificação do índice de vazamento, seguindo os mesmos passos descritos no item 4.1.2. O resultado encontrado foi um novo volume de vazamento de 0,101 Nm³/min, representando um novo percentual de vazamento de 4%, um resultado alcançado extremamente significativo, visto que os índices citados em literatura apontam para valores de percentuais não menores do que 10%.

4.1.6.2 Redução da pressão de trabalho e parametrização dos compressores

A segunda e a terceira ação realizada foram a redução da pressão de trabalho juntamente com a parametrização dos compressores. Nesta ação realizada, os valores sugeridos foram modificados, pois no momento da realização das ações foi verificado que a utilização do compressor 01 atenderia a demanda de ar comprimido da planta, e em momentos de aumento da demanda o compressor 02 entra em operação. A Tabela 7 mostra como ficaram as configurações finais dos compressores da instalação 01. A Figura 17 mostra como ficou a configuração final em cascata, mostrando que mesmo com uma vazão nominal menor conforme visto na Tabela 1, o compressor 01 atende à demanda normal de ar comprimido da planta,

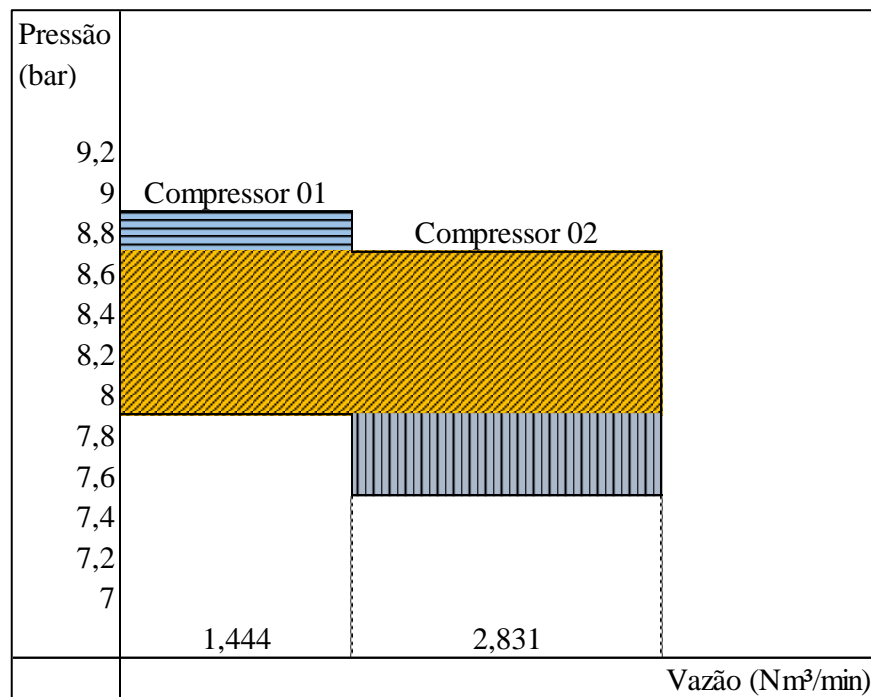
fazendo com que o compressor 02 seja acionado somente quando houver alguma demanda específica.

Tabela 7 – Configuração final da instalação 01

Configuração final		
Item	Compressor 01	Compressor 02
Pressão carga	8 bar	7,7 bar
Pressão alívio	8,8 bar	8,7 bar
Tempo em alívio	6 minutos	5 minutos

Fonte: Autor (2019).

Figura 17 – Configuração em cascata final da instalação 01



Fonte: Autor (2019).

A programação das pressões de trabalho visto na Figura 17 fez com que os compressores tenham seu funcionamento conforme a demanda de ar comprimido da instalação 01, ou seja, enquanto a necessidade de ar exigida não ultrapasse a vazão de 1,444 Nm³/min, o compressor 02 não entra em operação.

4.1.6.3 Redução da perda de carga

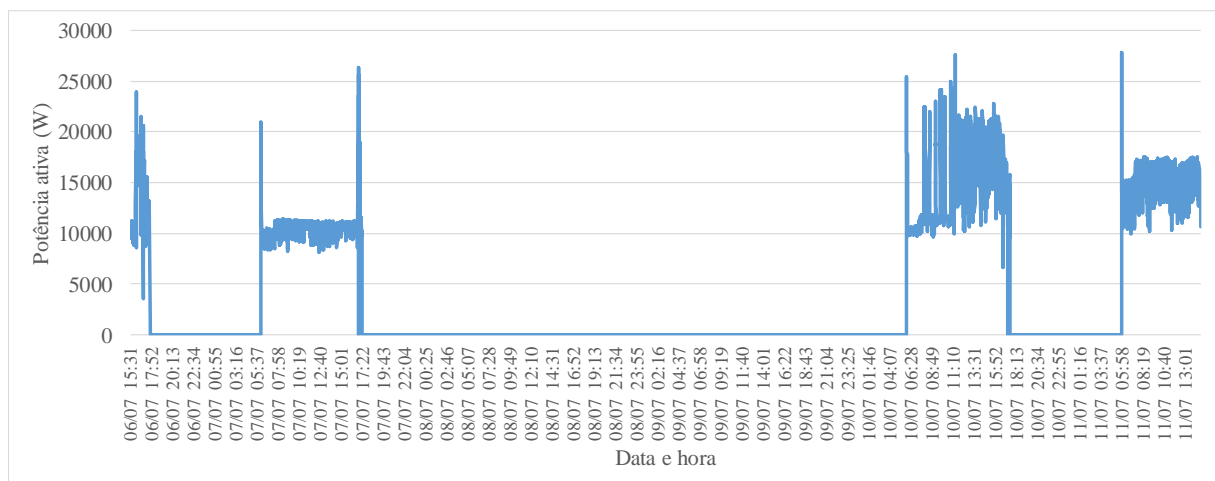
A ação sugerida para reduzir a perda de carga não foi possível ser realizada, pois demandou investimento para realizar todas as adequações necessárias, e a empresa da instalação 01 não dispunha deste montante no momento do estudo realizado.

4.1.7 Medição após a realização das ações e resultado final

Após as ações realizadas, com o intuito de verificar a eficácia das mesmas, foi acompanhada a operação da instalação 01 durante um período de 10 dias. Durante este acompanhamento foi verificado que os valores finais foram mantidos, comprovando a eficácia das ações.

Para fins de comprovação dos resultados com as ações realizadas, foram instalados novamente os analisadores de energia no mesmo ponto onde foi realizada a medição inicial. A medição foi realizada durante um período de uma semana. O resultado da soma das potências é apresentado na Figura 18.

Figura 18 – Potência total após intervenção

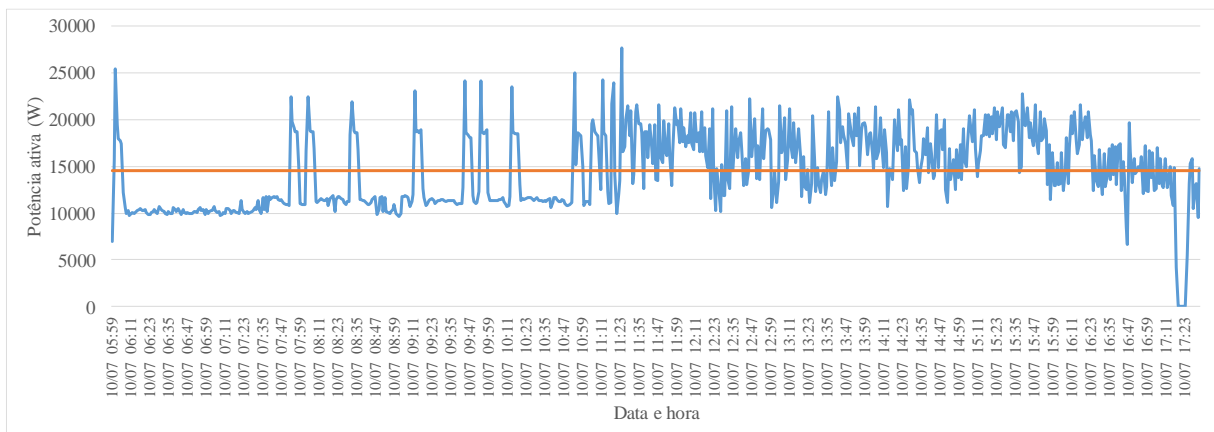


Fonte: Autor (2019).

Para realizar o cálculo da redução total da potência da instalação 01 foi destacada as medições dia 10/07/2017, conforme mostrado na Figura 19. No gráfico foi traçado a média da potência consumida no turno de trabalho que atingiu um patamar final de 14,49 kW, caracterizando assim uma média final de potência do sistema após a realização das ações de redução de consumo da instalação 01.

O resultado final da redução de consumo foi de 5,60 kWh perante uma projeção de 7,88 kWh, ou seja, uma redução total de 27,9%, conforme as médias entre os valores coletados antes das intervenções e após as intervenções realizadas. A diferença entre o valor de redução projetado e o encontrado mostra que a instalação 01 ainda tem oportunidades de efficientização no sistema de ar comprimido, visto que a ação de redução na perda de carga não foi realizada.

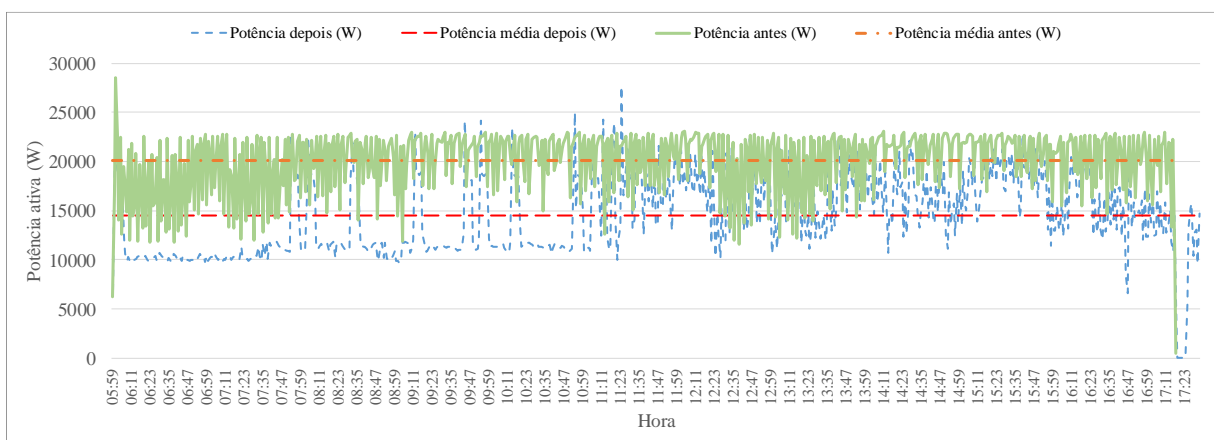
Figura 19 – Gráfico da potência ativa total do dia 10/07/2017 do sistema de ar comprimido da instalação 01



Fonte: Autor (2019).

A Figura 20 mostra a sobreposição dos gráficos das potências medidas da instalação 01 antes e depois das intervenções. A redução da potência média ao longo do turno de trabalho ficou evidente quando mostrado deste modo.

Figura 20 – Gráfico das potências antes x depois da instalação 01



Fonte: Autor (2019)

Com o intuito de mostrar um retorno financeiro para o projeto foi calculado a projeção de redução de custo, considerando que a instalação 01 opera por um período de 12 horas diária, durante 22 dias por mês em 12 meses no ano. Para a avaliação do tempo de retorno do capital investido foi considerado o valor da tarifa elétrica de R\$ 0,5099 por kWh consumido. O valor calculado para a redução de consumo anual foi de R\$ 8.738,33 (447,30 UPF). A Tabela 8 mostra os valores calculados e a Tabela 9 reporta os custos do projeto.

Tabela 8 – Resumo potência, consumo e custo antes x depois

Item	Antes	Depois	Diferença
Potência média	20,09 kW	14,49 kW	5,60 kW
Consumo mensal	5.119,21 kWh	3.691,37 kWh	1.427,84 kWh
Consumo anual	61.430,50 kWh	44.296,46 kWh	17.134,05 kWh
Custo anual	R\$ 31.329,43	R\$ 22.591,10	R\$ 8.738,33

Fonte: Autor (2019).

Tabela 9 – Custos do projeto

Item	Custo (R\$)
Diagnóstico	6.000,00
Mão de obra	1.200,00
Materiais	800,00
Total	7.400,00

Fonte: Autor (2019).

Os valores mostrados na Tabela 9 foram fornecidos pela empresa, não sendo detalhada a lista de materiais que foram utilizados para as correções.

4.1.8 Análise de retorno do investimento (*payback* descontado)

Para realizar a análise do retorno deste investimento foi utilizada a técnica do *payback* descontado, onde este considera os valores dos fluxos de caixa, descontado os valores da taxa mínima de atratividade (TMA), de forma a verificar o prazo de recuperação do capital investido. O estudo foi baseado em um valor para a taxa mínima de atratividade (TMA) de 10% ao ano (0,833% ao mês), taxa indicada pela empresa da instalação 01. Desta forma, os valores referentes ao custo total do projeto, valores de economia mensal e *payback* descontado para a instalação 01, pode ser visto na Tabela 10.

O estudo foi baseado em um fluxo de caixa para um período de 12 meses. O cálculo do retorno do investimento foi realizado tomando como base os valores mensais da economia gerada após as ações realizadas com relação ao custo total do projeto despendido pela empresa.

Com base nos dados da Tabela 10, é possível verificar que o retorno do investimento, calculado pelo método do *payback* descontado, deve ocorrer entre o décimo e o décimo primeiro mês. A fração de mês pode ser obtida dividindo o saldo do décimo mês e o fluxo de caixa descontado do décimo primeiro mês $|(-R\$ 440,98/R\$ 664,66)| = 0,66$. Sendo assim, o período do *payback* descontado foi de 10,66 meses.

Tabela 10 – Retorno do investimento

Mês	Fluxo de caixa	Fluxo de caixa descontado	Saldo
0	-R\$ 7.400,00	-R\$ 7.400,00	-R\$ 7.400,00
1	R\$ 728,19	R\$ 722,18	-R\$ 6.677,82
2	R\$ 728,19	R\$ 716,21	-R\$ 5.961,62
3	R\$ 728,19	R\$ 710,29	-R\$ 5.251,33
4	R\$ 728,19	R\$ 704,42	-R\$ 4.546,91
5	R\$ 728,19	R\$ 698,60	-R\$ 3.848,31
6	R\$ 728,19	R\$ 692,82	-R\$ 3.155,49
7	R\$ 728,19	R\$ 687,10	-R\$ 2.468,39
8	R\$ 728,19	R\$ 681,42	-R\$ 1.786,97
9	R\$ 728,19	R\$ 675,79	-R\$ 1.111,19
10	R\$ 728,19	R\$ 670,20	-R\$ 440,98
11	R\$ 728,19	R\$ 664,66	R\$ 223,68
12	R\$ 728,19	R\$ 659,17	R\$ 882,85

Fonte: Autor (2019).

A partir dos dados da Tabela 10 também foram calculados os valores para a taxa interna de retorno (TIR) que ficou em 31,9% e da taxa interna de retorno modificada (MTIR) que ficou em 21,4%, comprovando que o projeto foi viável financeiramente, perante a TMA pré-estabelecida pela empresa.

4.2 DETERMINAÇÃO DAS OPORTUNIDADES DE EFICIENTIZAÇÃO DO SISTEMA DE AR COMPRIMIDO NA SEGUNDA INSTALAÇÃO

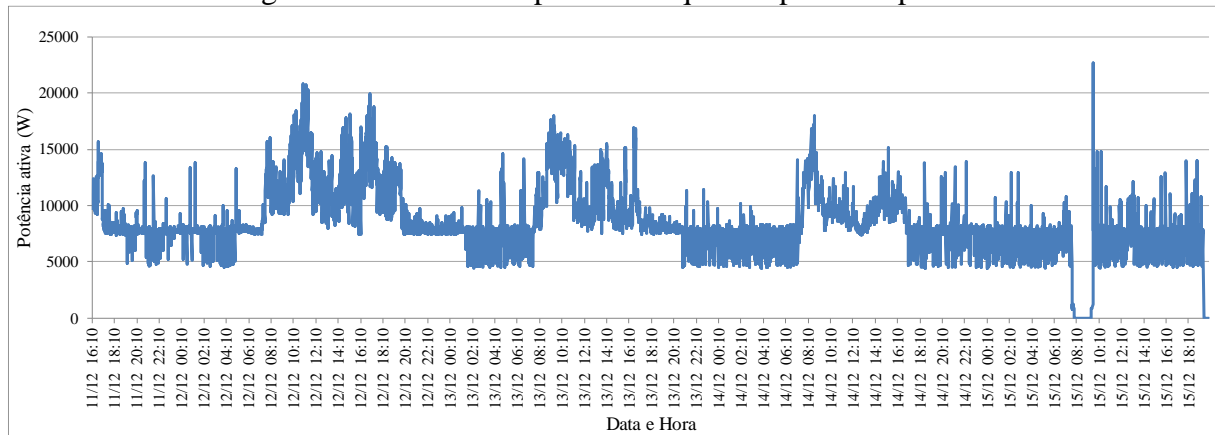
As oportunidades de efficientização encontradas na segunda instalação avaliada, são mostradas na mesma sequência que o fluxo da Figura 10 e no apêndice B, sendo detalhados nos

tópicos a seguir. Após as análises é apresentado um diagnóstico juntamente com ações propostas para melhorar a eficiência do sistema de ar comprimido.

4.2.1 Potências elétricas requeridas pelos compressores de ar comprimido

Utilizando analisadores de energia, e registrando os valores de potência ativa requerida pelo compressor a intervalos de um minuto, foi obtido o gráfico da Figura 21, onde é mostrada a curva de potência do compressor. Como este compressor possui rotação variável o mesmo opera modulando a rotação e potência, durante os turnos de trabalho.

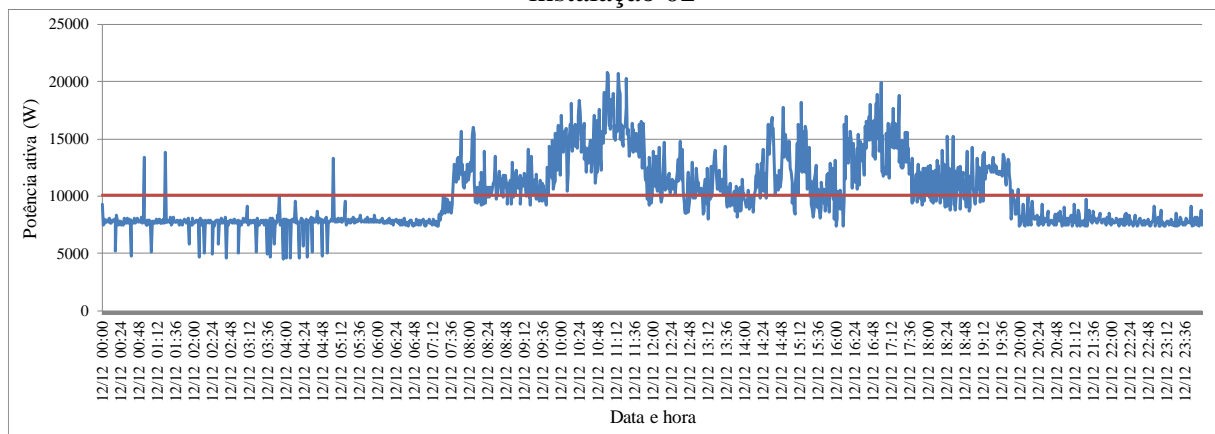
Figura 21 – Gráfico de potência requerida pelo compressor



Fonte: Autor (2019).

Como forma de mensurar uma média de potência total consumida foi destacada as medições durante o turno de trabalho do dia 12/12/2018, conforme mostrado na Figura 22.

Figura 22 – Gráfico da potência ativa no dia 12/12/2018 do sistema de ar comprimido da instalação 02



Fonte: Autor (2019).

No gráfico foi traçada a média da potência consumida neste dia de trabalho, onde atingiu um patamar de 10,08 kW, caracterizando assim uma média de potência do sistema antes de realizar qualquer ação de redução de consumo da instalação 02.

4.2.2 Índice de vazamentos de ar comprimido

Outra avaliação realizada foi a obtenção do percentual de vazamento da rede de ar interna da empresa. Visto que o compressor da instalação 02 é de rotação variável, o ensaio para medir este percentual ocorreu conforme os passos abaixo:

- Passo 01 – instalar um analisador de energia na alimentação elétrica do compressor.
- Passo 02 – desligar todos os consumidores de ar comprimido.
- Passo 03 – manter apenas o compressor de ar ligado durante pelo menos 10 minutos.
- Passo 04 – finalizar o ensaio e avaliar as informações do que foi registrado no analisador de energia.

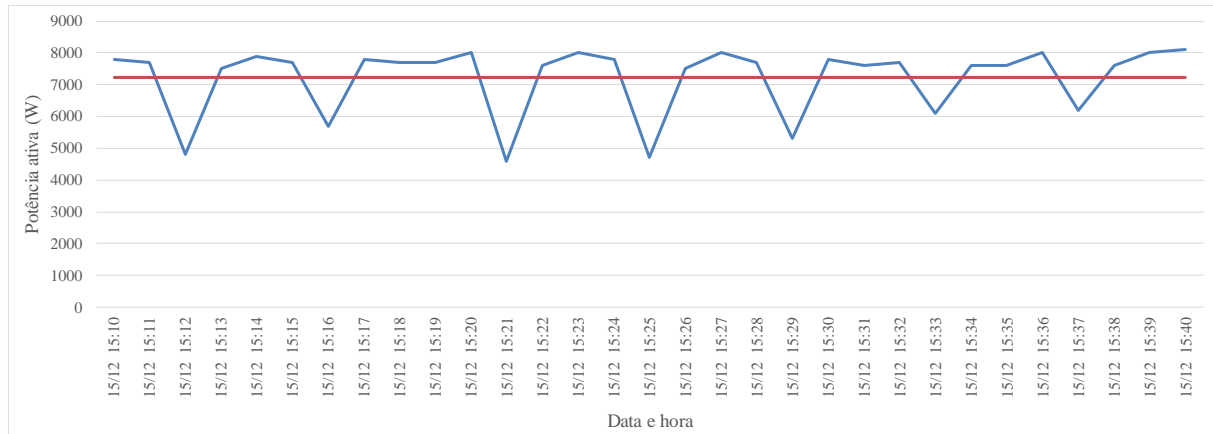
Neste caso o ensaio foi realizado durante um período de 30 minutos, onde a Figura 23 mostra a curva de potência utilizada pelo compressor, sem que a instalação necessitasse de ar comprimido. A variação da potência mostra que, pelo fato do compressor de velocidade variável operar em malha fechada com um sensor de pressão, o motor aumenta a rotação quando a pressão da rede de ar reduzir pelos vazamentos, assim como quando a pressão chega a um valor pré-definido (neste caso 8,1 bar), a rotação diminui, diminuindo a potência elétrica requerida e a vazão de fornecimento. Além de acionamentos, de tempos em tempos, de purgadores automáticos ao longo da rede de ar funcionarem como “vazamentos programados”, aumentando o consumo de potência do sistema.

O funcionamento com a fábrica parada, ou seja, sem vazamentos, após o compressor atingir a pressão de trabalho requerida pelo sistema, o mesmo reduz a rotação até um valor mínimo programado pelo fabricante (mínimo este que não prejudica o funcionamento do motor). Na sequência com o compressor trabalhando na rotação mínima, esse continua aumentando a pressão da rede de ar até atingir a pressão de alívio (8,1 bar), a partir desse instante, o compressor mantém a rotação mínima, mas sem produzir ar comprimido. Após o tempo pré-programado do compressor em alívio ser alcançado, o mesmo desliga, permanecendo assim até a rede necessitar de ar.

Com a potência medida, e calculando a média destes valores, chega-se a uma potência média de utilização do sistema para atender os vazamentos de 7,22 kW de potência ativa.

Sabendo que a vazão nominal do compressor 3,511 Nm³/min quando o mesmo está em plena carga, ou seja, utilizando toda a potência que é de 22,37 kW (30 hp).

Figura 23 – Ensaio para medir vazamentos



Fonte: Autor (2019).

Para calcular o volume de vazamento, primeiro é necessário encontrar a relação entre a potência consumida em relação a potência máxima $(7,22/22,37) \cdot 100 = 32,27\%$ e de posse do valor dessa relação, multiplica-se pela vazão nominal do compressor e encontra-se um volume de vazamento de 1,133 Nm³/min.

4.2.3 Parametrização do compressor e pressão de trabalho

Inicialmente, a fim de detectar qual a mínima pressão manométrica de trabalho requerida pela planta fabril, foi obtido dos catálogos dos equipamentos consumidores a pressão mínima do ar comprimido de 7 bar. E para atender esta demanda de ar, o compressor está configurado para gerar ar comprimido em 7,5 bar, como o compressor é de rotação variável, o compressor trabalha para manter esta pressão, se a demanda reduzir, o compressor aumenta a pressão da rede até o máximo programado (pressão de alívio) de 8,1 bar.

Na sequência foi realizada a medição da pressão de trabalho com um manômetro em três pontos diferentes da rede, sendo o primeiro ponto de medição junto ao primeiro equipamento consumidor de ar comprimido, localizado a 2 metros da sala dos compressores. O segundo ponto medido, localiza-se a 20 metros da sala dos compressores, já a terceira medição está a uma distância de 60 metros da sala dos compressores. Nesta verificação foi avaliado que a perda de carga é de 0,4 bar, entre a geração do ar comprimido até o primeiro ponto de medição.

A utilização das equações 5 e 6 é realizada neste momento, a fim de avaliar as oportunidades encontradas tanto na perda de carga (equação (5)) quanto na pressão de fornecimento (equação (6)). Substituindo os valores de p_{af} que é de 7,1 bar, p_{rq} que é de 7 bar e de p_f que é de 7,5 bar, encontra-se os valores a seguir.

$$\Delta p_c = \frac{p_{af}}{p_f} = \frac{7,1}{7,5} \cong 0,95$$

$$\Delta p_f = \frac{p_{rq}}{p_f} = \frac{7}{7,5} \cong 0,93$$

Os valores encontrados mostram que não houve evidência de oportunidade para correção na perda de carga e pressão de fornecimento, pois os indicadores estão acima do especificado.

4.2.4 Diagnóstico

Considerando os dados levantados nos itens 4.2.1, 4.2.2 e 4.2.3 tem-se a oportunidade de efficientização na redução de vazamentos.

Com a redução no número de vazamentos, a quantidade de ar gerada para suprir a demanda de ar comprimido das máquinas e equipamentos foi reduzida, evitando todo o trabalho de geração a mais que está sendo eliminado para o ambiente gerando apenas consumo desnecessário de energia.

4.2.5 Ação sugerida para redução de energia

Conforme mostrado no item 4.2.4, é necessária uma ação para atingir-se resultados de economia de energia no sistema de ar comprimido, essa refere-se à redução de vazamentos de ar comprimido.

Relativo à redução de vazamentos a ação sugerida foi a de realizar uma verificação dos pontos de vazamentos. Após foi realizada as correções do maior número de vazamentos os quais foram possíveis de serem verificados sem a utilização de equipamentos de detecção, ou seja, apenas os vazamentos audíveis.

Como a medição inicial do índice de vazamento indicou a potência média necessária para os vazamentos de 7,22 kW (32,27%). Fazendo uma projeção para a redução de vazamento de 32,27% para um valor de 10%, valor esse indicado pela literatura como “aceitável”, obtendo-se um valor de 2,23 kW de potência para vazamentos, uma projeção de redução de 4,99 kW somente em vazamentos. Este valor sugere que a potência do sistema de ar comprimido reduza de um valor atual de 10,08 kW de potência média para um valor de 5,09 kW de potência média.

4.2.6 Ações realizadas e resultados finais

A instalação 02 teve uma ação sugerida como forma de ganho de eficiência energética no sistema de ar comprimido, cujo detalhamento da execução é mostrado a seguir.

Na ação de redução de vazamentos foram encontrados diversos pontos de vazamento de ar comprimido, sendo que os principais estavam em pontos de conexões de engate rápido, mangueiras flexíveis com furos e/ou rasgos, unidades de lubrificação e limpeza do ar (lubrifils), os purgadores automáticos foram revisados e ajustados de maneira mais eficiente os tempos de purga, além da instalação de um purgador automático totalmente mecanizado logo na saída do compressor.

Após as ações relacionadas acima, foi novamente realizado o ensaio para a verificação do índice de vazamento, seguindo os mesmos passos descritos no item 4.2.2. O resultado encontrado foi um novo volume de vazamento de 0,712 Nm³/min, representando um novo percentual de 20,3%.

4.2.7 Medição após a realização das ações e resultado final

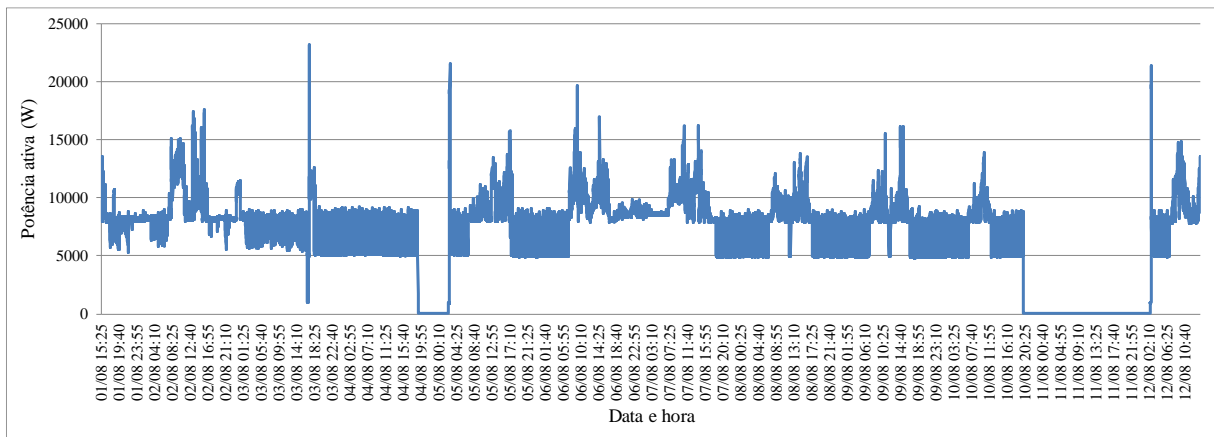
Após a ação realizada, com o intuito de verificar a eficácia das mesmas, foi acompanhada a operação da instalação 02 durante um período de 30 dias. Durante este acompanhamento foi verificado que os valores finais foram mantidos, comprovando a eficácia das ações.

Para fins de comprovação do resultado com a ação realizada, foi instalado novamente o analisador de energia no mesmo ponto onde foi realizada a medição inicial. A medição foi realizada durante um período de uma semana. O resultado da soma das potências é apresentado na Figura 24.

Para realizar o cálculo da redução total da potência da instalação 02 foi destacada as medições no dia 06/08/2019, conforme mostrado na Figura 25. No gráfico foi traçado a média

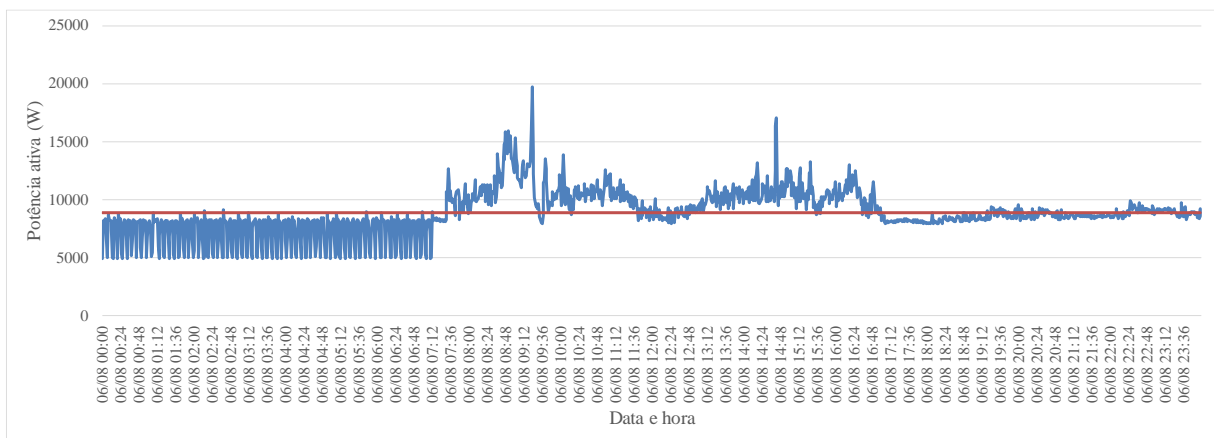
da potência consumida no dia de trabalho que atingiu um patamar final de 8,88 kW, caracterizando assim uma média final de potência do sistema após a realização das ações de redução de consumo da instalação 02.

Figura 24 – Potência total após intervenção



Fonte: Autor (2019).

Figura 25 – Gráfico da potência ativa



Fonte: Autor (2019).

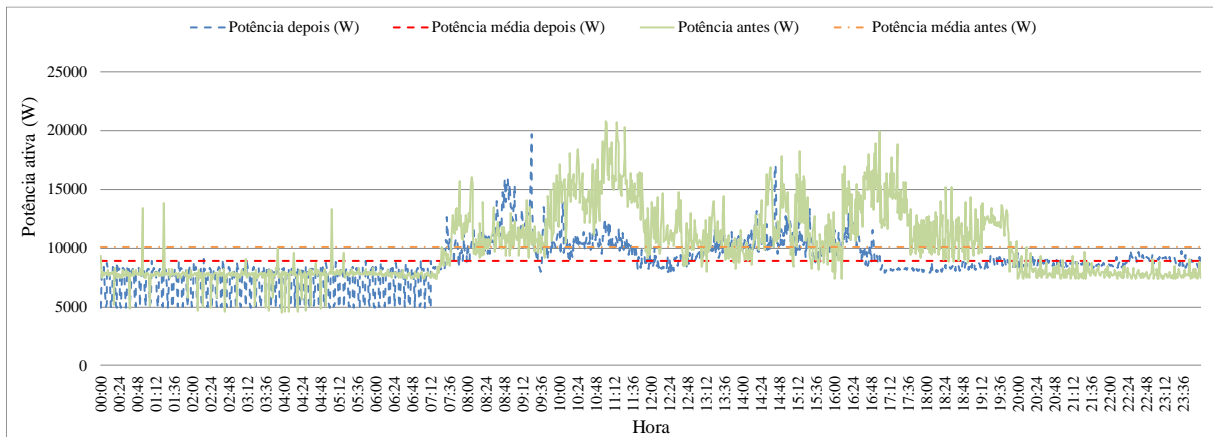
O resultado final da redução de consumo foi de 1,20 kW, ou seja, uma redução total de 11,9%, conforme as médias entre os valores coletados antes das intervenções e após as intervenções realizadas.

A Figura 26 mostra a sobreposição dos gráficos das potências medidas da instalação 02 antes e depois das intervenções. A redução da potência média ao longo do dia de trabalho ficou evidente quando mostrado deste modo.

Com o intuito de mostrar um retorno financeiro para o projeto foi calculado a projeção de redução de custo, considerando que a instalação 02 opera 24 horas diárias, durante 22 dias por

mês em 12 meses no ano. Para a avaliação do tempo de retorno do capital investido foi considerado o valor da tarifa elétrica de R\$ 0,628 por kWh consumido. O valor calculado para a redução de consumo anual foi de R\$ 4.774,81 (244,42 UPF). A Tabela 11 mostra os valores calculados e a Tabela 12 mostra os custos do projeto.

Figura 26 – Gráfico das potências antes x depois da instalação 02



Fonte: Autor (2019)

Tabela 11 – Resumo potência, consumo e custo antes x depois

Item	Antes	Depois	Diferença
Potência média	10,08 kW	8,88 kW	1,20 kW
Consumo mensal	5.322,24 kWh	4.688,64 kWh	633,60 kWh
Consumo anual	63.866,88 kWh	56.263,68 kWh	7.603,20 kWh
Custo anual	R\$ 40.108,40	R\$ 35.333,59	R\$ 4.774,81

Fonte: Autor (2019).

Tabela 12 – Custos do projeto

Item	Custo (R\$)
Diagnóstico	6.000,00
Mão de obra	1.200,00
Materiais	200,00
Total	8.000,00

Fonte: Autor (2019).

Os custos com mão de obra foram maiores devido a necessidade de contratação de serviços de terceiros para execução de boa parte das correções.

4.2.8 Análise de retorno do investimento (*payback* descontado)

Para realizar a análise do retorno deste investimento foi utilizada a técnica do *payback* descontado. A Tabela 13 apresenta o estudo, considerando os valores dos fluxos de caixa, descontado os valores da taxa mínima de atratividade (TMA), de forma a verificar o prazo de recuperação do capital investido.

Tabela 13 – Retorno do investimento

Mês	Fluxo de caixa	Fluxo de caixa descontado	Saldo
0	-R\$ 8.000,00	-R\$ 8.000,00	-R\$ 8.000,00
1	R\$ 397,90	R\$ 394,61	-R\$ 7.605,39
2	R\$ 397,90	R\$ 391,35	-R\$ 7.214,04
3	R\$ 397,90	R\$ 388,12	-R\$ 6.825,92
4	R\$ 397,90	R\$ 384,91	-R\$ 6.441,01
5	R\$ 397,90	R\$ 381,73	-R\$ 6.059,28
6	R\$ 397,90	R\$ 378,57	-R\$ 5.680,71
7	R\$ 397,90	R\$ 375,44	-R\$ 5.305,26
8	R\$ 397,90	R\$ 372,34	-R\$ 4.932,92
9	R\$ 397,90	R\$ 369,26	-R\$ 4.563,66
10	R\$ 397,90	R\$ 366,21	-R\$ 4.197,44
11	R\$ 397,90	R\$ 363,19	-R\$ 3.834,26
12	R\$ 397,90	R\$ 360,18	-R\$ 3.474,07
13	R\$ 397,90	R\$ 357,21	-R\$ 3.116,87
14	R\$ 397,90	R\$ 354,26	-R\$ 2.762,61
15	R\$ 397,90	R\$ 351,33	-R\$ 2.411,28
16	R\$ 397,90	R\$ 348,42	-R\$ 2.062,86
17	R\$ 397,90	R\$ 345,55	-R\$ 1.717,31
18	R\$ 397,90	R\$ 342,69	-R\$ 1.374,62
19	R\$ 397,90	R\$ 339,86	-R\$ 1.034,77
20	R\$ 397,90	R\$ 337,05	-R\$ 697,72
21	R\$ 397,90	R\$ 334,26	-R\$ 363,45
22	R\$ 397,90	R\$ 331,50	-R\$ 31,95
23	R\$ 397,90	R\$ 328,76	R\$ 296,81
24	R\$ 397,90	R\$ 326,04	R\$ 622,85

Fonte: Autor (2019).

O estudo foi baseado em um valor para a taxa mínima de atratividade (TMA) de 10% ao ano (0,833% ao mês), taxa indicada pela empresa da instalação 02, fluxo de caixa para um período de 24 meses. O cálculo do retorno do investimento foi realizado tomando como base os valores mensais da economia gerada após as ações realizadas com relação ao custo total do projeto despendido pela empresa. Desta forma, os valores referentes ao custo total do projeto, valores de economia mensal e *payback* descontado para a instalação 02, pode ser visto na Tabela 13.

Com base nos dados da Tabela 13, é possível verificar que o retorno do investimento, calculado pelo método do *payback* descontado, deve ocorrer entre o vigésimo segundo e o vigésimo terceiro mês. A fração de mês pode ser obtida dividindo o saldo do décimo mês e o fluxo de caixa descontado do décimo primeiro mês $|(-R\$ 31,95/R\$ 328,76)| = 0,09$. Sendo assim, o período do *payback* descontado foi de 22,09 meses.

A partir dos dados da Tabela 13 também foram calculados os valores para a taxa interna de retorno (TIR) que ficou em 1,5% e da taxa interna de retorno modificada (MTIR) que ficou em 1,1%. Esses valores representam pouca viabilidade financeira, tendo em vista a TMA pré-estabelecida pela empresa.

4.3 DETERMINAÇÃO DAS OPORTUNIDADES DE EFICIENTIZAÇÃO DO SISTEMA DE AR COMPRIMIDO NA TERCEIRA INSTALAÇÃO

As oportunidades de efficientização encontradas na terceira instalação avaliada, sendo mostradas na mesma sequência que o fluxo da Figura 10 e no Apêndice B, são detalhados nos tópicos a seguir. Após as análises é apresentado um diagnóstico juntamente com ações propostas para melhorar a eficiência do sistema de ar comprimido.

4.3.1 Potências elétricas requeridas pelos compressores de ar comprimido

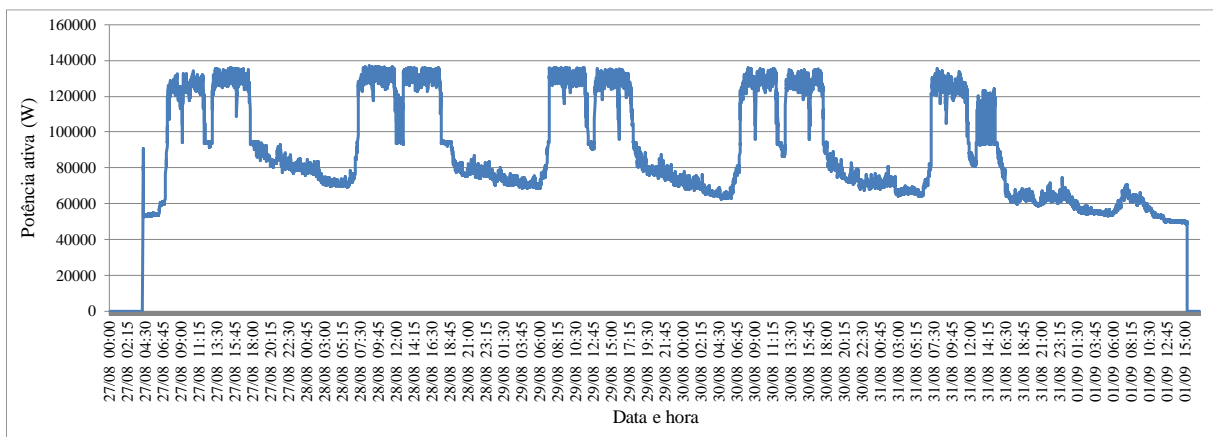
Um analisador de energia foi instalado no ponto de alimentação global do sistema de ar comprimido da instalação, registrando os valores de potência ativa requerida pelos compressores a intervalos de um minuto, foi obtido o gráfico da Figura 27.

Em avaliação realizada, para atender a demanda de ar da instalação 03, o compressor 01 e o compressor 03 estavam ligados em paralelo fornecendo ar comprimido ao sistema. Os

compressores 02 e 04 são utilizados como *backup's*, e durante a realização do trabalho esses não entraram em operação.

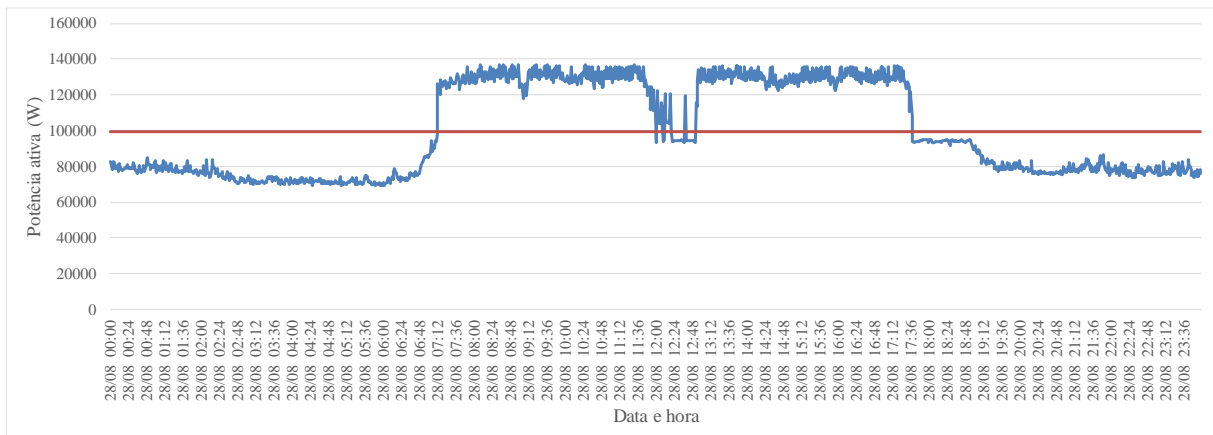
Como forma de mensurar uma média de potência total consumida foi destacada as medições durante o dia 28/08/2018, conforme mostrado na Figura 28.

Figura 27 – Gráfico de potência total requerida pelo sistema de ar comprimido da instalação 03



Fonte: Autor (2019).

Figura 28 – Gráfico da potência ativa total no dia 28/08/2018 do sistema de ar comprimido da instalação 03



Fonte: Autor (2019).

No gráfico foi traçada a média da potência consumida neste dia de trabalho, onde atingiu um patamar de 99,63 kW, caracterizando assim uma média de potência do sistema antes de realizar qualquer ação de redução de consumo da instalação 03.

4.3.2 Índice de vazamentos de ar comprimido

A instalação 03, possui compressores de rotação variável e compressores carga/alívio, desta forma foram utilizados os dois métodos já detalhados anteriormente para verificar o índice de vazamentos.

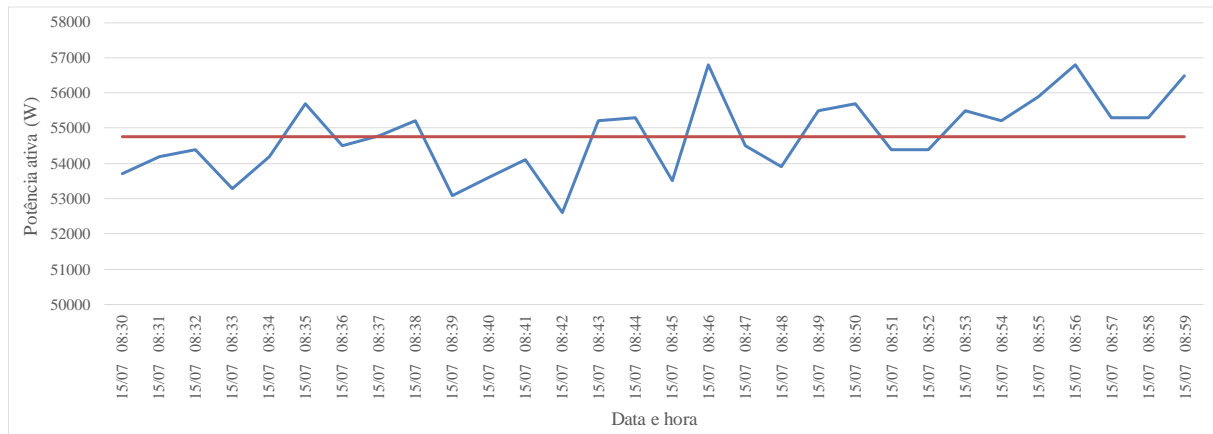
O método para compressor carga/alívio é mais simples, pois necessita apenas de um cronômetro, portanto foi inicialmente realizado. Seguindo os passos citados no item 4.1.2 chegou-se até o ponto em que apenas o compressor carga/alívio estivesse ligado. Porém foi detectado que o compressor, além de não atingir a pressão de trabalho previamente configurada, não entrava em alívio, isso se deve ao fato de que mesmo com o compressor em carga, a vazão de fornecimento do compressor carga/alívio (6,966 Nm³/min) era insuficiente para suprir a vazão de vazamento da rede.

Devido ao que foi relatado no parágrafo anterior, foi utilizado o método de medição da potência para obtenção do percentual de vazamento da rede de ar interna da empresa. Visto que a instalação 03 possui compressores de rotação variável, o ensaio para medir este percentual ocorreu conforme os passos abaixo:

- Passo 01 – instalar um analisador de energia na alimentação elétrica dos compressores.
- Passo 02 – desligar todos os consumidores de ar comprimido.
- Passo 03 – manter apenas o compressor de ar com rotação variável ligado durante pelo menos 10 minutos.
- Passo 04 – finalizar o ensaio e avaliar as informações do que foi registrado no analisador de energia.

Neste caso o ensaio foi realizado durante um período de 30 minutos, a Figura 29 mostra o perfil da curva de potência que o compressor utilizou sem que a instalação necessitasse de ar comprimido. A variação encontrada na figura, deve-se a variação na potência fornecida a fim de manter a pressão de trabalho configurada (7,6 bar), além de que a rede possui purgadores automáticos, cujo os mesmos atuam como “vazamentos programados”.

Figura 29 – Ensaio para medir vazamentos



Fonte: Autor (2019).

Com a potência medida, e calculando a média destes valores, chega-se a uma potência média de utilização do sistema para atender os vazamentos de 54,77 kW de potência ativa. Sabendo que a vazão nominal do compressor utilizado para fazer o ensaio é de 15,563 Nm³/min quando o mesmo está em plena carga, ou seja, utilizando toda a potência que é de 74,57 kW (100 hp). Para calcular o volume de vazamento, primeiro é necessário encontrar a relação entre a potência consumida em relação a potência máxima $(54,77/74,57) \cdot 100 = 73,45\%$. Tendo o valor dessa razão, multiplica-se pela vazão nominal do compressor e encontra-se um volume de vazamento de 11,431 Nm³/min.

4.3.3 Parametrização dos compressores e pressão de trabalho

Inicialmente, a fim de detectar qual a mínima pressão manométrica de trabalho requerida pela planta fabril, foi obtido dos catálogos dos equipamentos consumidores a pressão mínima do ar comprimido de 6 bar. E para atender esta demanda de ar, o compressor 01 e o compressor 03 estavam ligados em paralelo ao sistema e configurados para gerar ar comprimido dentro de uma faixa de pressão de 7,6 a 8,2 bar.

Na sequência foi realizada a medição da pressão de trabalho com um manômetro em três pontos diferentes da rede, sendo o primeiro ponto de medição junto ao primeiro equipamento consumidor de ar comprimido, localizado a 15 metros da sala dos compressores. O segundo ponto medido, localiza-se a 40 metros da sala dos compressores, já a terceira medição está a uma distância de 100 metros da sala dos compressores. Nesta verificação foi avaliado que a perda de carga é de 0,2 bar, entre a geração do ar comprimido até o primeiro ponto de medição.

A utilização das equações 5 e 6 é realizada neste momento, a fim de avaliar as oportunidades encontradas tanto na perda de carga (equação (5)) quanto na pressão de fornecimento (equação (6)). Substituindo os valores de p_{af} que é de 7,4 bar, p_{rq} que é de 6 bar e de p_f que é de 7,6 bar, encontramos os valores a seguir.

$$\Delta p_c = \frac{p_{af}}{p_f} = \frac{7,4}{7,6} \cong 0,97$$

$$\Delta p_f = \frac{p_{rq}}{p_f} = \frac{6}{7,6} \cong 0,79$$

Os valores encontrados mostram oportunidade para que a pressão de fornecimento seja reduzida, pois o indicador calculado foi de 0,79, menor que o especificado que é 0,85. As atuações nesse ponto visam melhorar a eficiência energética do sistema de ar comprimido da instalação 03.

4.3.4 Diagnóstico

Considerando os dados levantados nos itens 4.3.1, 4.3.2 e 4.3.3 tem-se a oportunidade de efficientização nos tópicos abaixo:

- Redução da pressão de trabalho.
- Redução de vazamentos.
- Parametrização dos compressores.

Com a redução da pressão de trabalho, os compressores trabalham com menor potência elétrica para geração de ar. Com a redução no número de vazamentos, a quantidade de ar gerada para suprir a demanda de ar comprimido das máquina e equipamentos foi reduzida, evitando todo o trabalho de geração a mais que está sendo eliminado para o ambiente gerando apenas consumo desnecessário de energia. Com a parametrização adequada das pressões de trabalho dos compressores, a economia é dada pela possibilidade de utilização otimizada dos mesmos, não necessitando que ambos trabalhem ao mesmo tempo sem que tenha necessidade real de fornecer a vazão total para o sistema.

4.3.5 Ações sugeridas para redução de energia

Conforme mostrado em tópicos no item 4.3.4, são necessárias uma série de ações para atingir-se resultados de economia de energia no sistema de ar comprimido.

4.3.5.1 Pressão de trabalho e parametrização dos compressores

Nos tópicos de redução da pressão de trabalho juntamente com a de parametrização dos compressores, as ações sugeridas são: redução da pressão de trabalho na relação de carga e alívio, e deixar os compressores operando em modo cascata, a Tabela 14 mostra a configuração atual dos compressores da instalação 03. Como já mencionado no item 4.3.1 os dois compressores estavam parametrizados com a mesma faixa de pressão de trabalho. Quanto aos compressores 02 e 04, as configurações não foram relatadas na Tabela 14 pois os mesmos se encontravam desligados.

Tabela 14 – Configuração atual dos compressores da instalação 03

Configuração atual		
Item	Compressor 01	Compressor 03
Pressão carga	7,6 bar	7,5 bar
Pressão alívio	8,2 bar	8,0 bar
Tempo em alívio	1 minuto	6 minutos

Fonte: Autor (2019).

A sugestão de configuração para o sistema é mostrada na Tabela 15, onde se tem redução na pressão de trabalho, configuração em modo cascata e tempos em alívio. Com esta configuração é estimada a redução da pressão manométrica de 7,6 para 7,1 bar, e sabendo que conforme literatura, a cada bar manométrico reduzido tem-se uma redução no consumo de energia na faixa de 7%, estima-se uma redução total de 3,5%. Com este percentual, pode-se projetar que a potência média do sistema passará de 99,63 kW para um novo valor médio de 96,14 kW, uma diferença de 3,49 kW.

A configuração em modo cascata é ilustrada na Figura 30, esta configuração faz com que o compressor 03, configurado em uma faixa de pressão menor que o compressor 01, seja ligado apenas no caso em que mesmo com o compressor 01 em carga a pressão da rede diminua a um nível de pressão manométrica de 6,5 bar.

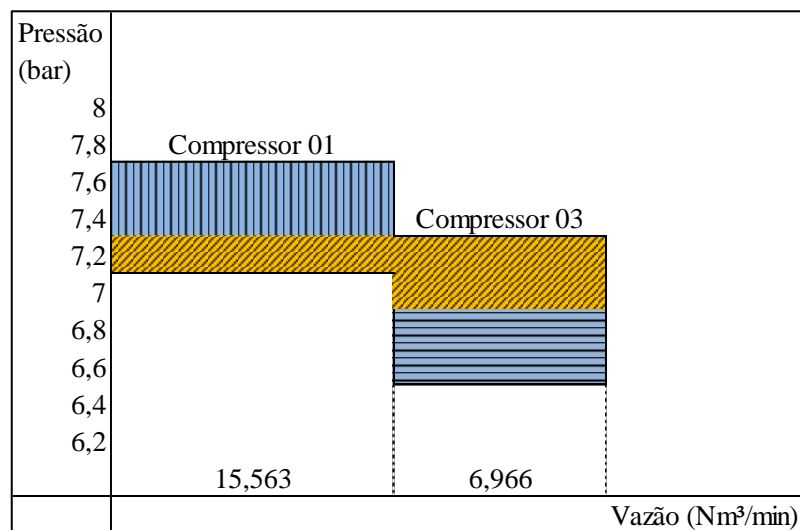
Tabela 15 – Sugestão de configuração da instalação 03

Sugestão de configuração		
Item	Compressor 01	Compressor 03
Pressão carga	7,1 bar	6,5 bar
Pressão alívio	7,6 bar	7,3 bar
Tempo em alívio	1 minutos	6 minutos

Fonte: Autor (2019).

Quando esta pressão manométrica atingir o valor de 7,3 bar, o compressor 03 entra em alívio. Se a pressão de trabalho não reduzir novamente até a pressão manométrica de 6,5 bar, o mesmo permanecerá em alívio durante 6 minutos e após esse tempo irá desligar, fazendo com que apenas o compressor 01 permaneça ligado, modulando a rotação e fornecendo ar comprimido para a instalação. Nesta sugestão de configuração, o compressor 01 atenderá o consumo base da instalação, quando esta necessitar de vazão de ar maior, o compressor 03 entra em operação para suprir esta necessidade.

Figura 30 – Configuração dos compressores em cascata



Fonte: Autor (2019).

Não é possível estimar uma redução no consumo de energia realizando a programação das pressões manométricas de trabalho nos compressores de ar, devido ao fato de que o funcionamento do compressor 03 fica dependente da demanda de ar que a planta necessita, e como este consumo não é constante qualquer valor estimado neste tópico não estará correto.

4.3.5.2 Redução de vazamentos

Relativo à redução de vazamentos a ação sugerida foi a de realizar uma verificação dos pontos de vazamentos, os quais sejam possíveis de serem verificados sem a utilização de equipamentos de detecção, ou seja, apenas os vazamentos audíveis.

Como a medição inicial do índice de vazamento que indicou a potência média necessária de 54,77 kW (73,45%), fazendo uma projeção para a redução de vazamento de 73,45% para um valor de 10%, valor esse indicado pela literatura como “aceitável”, obtém-se um valor de 7,46 kW de potência para vazamentos. Com isso, há uma projeção de redução de 47,31 kW somente em vazamentos. Esse valor sugere que a potência do sistema de ar comprimido reduza de um valor atual de 99,63 kW de potência média para um valor de 52,32 kW de potência média.

A soma das ações sugeridas (parametrização das pressões de trabalho e redução de vazamentos) geraria um valor total de redução na faixa de 50,80 kW na potência média, reduzindo de 99,63 kW para 48,83 kW, uma relação de redução total de 49,0 %.

4.3.6 Ações realizadas e resultados finais

Como forma de priorizar os esforços na realização das ações sugeridas, estas foram executadas em sequência, sendo que uma ação só é realizada quando a ação anterior foi finalizada.

4.3.6.1 Redução de Vazamentos

A primeira ação realizada foi a de redução de vazamentos. Nesta primeira ação foram encontrados diversos pontos de vazamento de ar comprimido, sendo que os principais estavam em pontos de conexões de engate rápido, mangueiras flexíveis com furos e/ou rasgos, unidades de lubrificação e limpeza do ar (lubrifils) entre outros pontos.

Após as primeiras correções dos pontos de vazamento, foi novamente realizado o ensaio para a verificação do índice de vazamento, seguindo os mesmos passos descritos no item 4.3.2. O resultado encontrado foi um novo volume de vazamento de 10,865 Nm³/min, representando um novo percentual de vazamento de 69,8%. A ação de redução de vazamentos não atingiu um

resultado de redução esperado. O fato de que a empresa optou por executar as correções utilizando apenas mão de obra interna, foram executadas novas correções nos pontos que ainda estavam com vazamentos. Novamente foi verificado um novo índice de vazamentos seguindo os passos no item 4.3.2, o resultado neste momento mostrou um novo volume de vazamento de 9,110 Nm³/min, representando um novo percentual de vazamento de 58,5%.

A ação de redução de vazamentos tornou uma rotina de manutenção para a instalação 03, tratando rotineiramente ações para reduzir ainda mais o volume encontrado.

4.3.6.2 Redução da pressão de trabalho e parametrização dos compressores

A segunda e a terceira ação realizada foram a redução da pressão de trabalho juntamente com a parametrização dos compressores. Nesta ação realizada, os valores sugeridos na seção 4.3.5.1 foram mantidos pois após as alterações realizadas, a planta continuou a operar normalmente

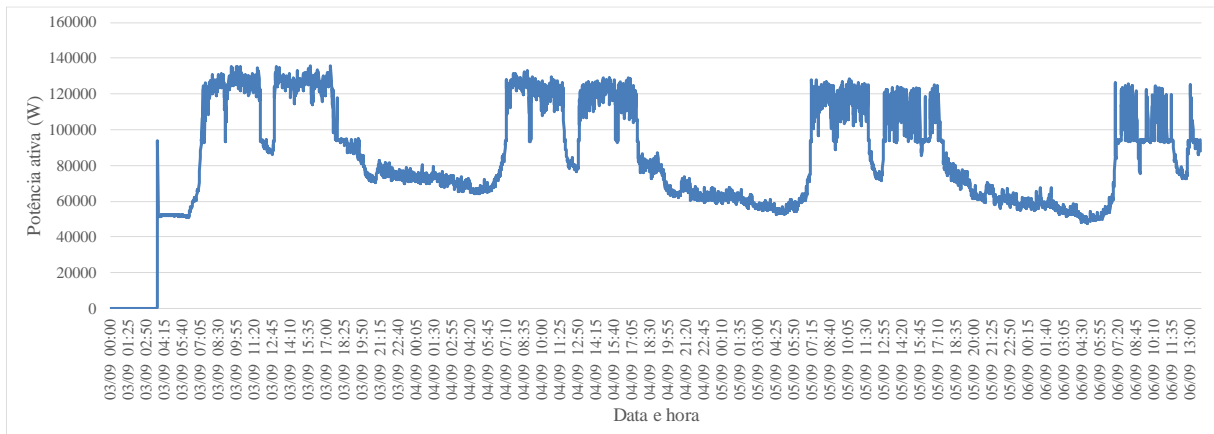
4.3.7 Medição após a realização das ações e resultado final

Após as ações realizadas, com o intuito de verificar a eficácia das mesmas, foi acompanhada a operação da instalação 03 durante um período de 10 dias. Durante este acompanhamento foi verificado que os valores finais foram mantidos, comprovando a eficácia das ações.

Para fins de comprovação dos resultados com as ações realizadas, foram instalados novamente o analisador de energia no mesmo ponto onde foi realizada a medição inicial. A medição foi realizada durante um período de uma semana. O resultado da soma das potências é apresentado na Figura 31.

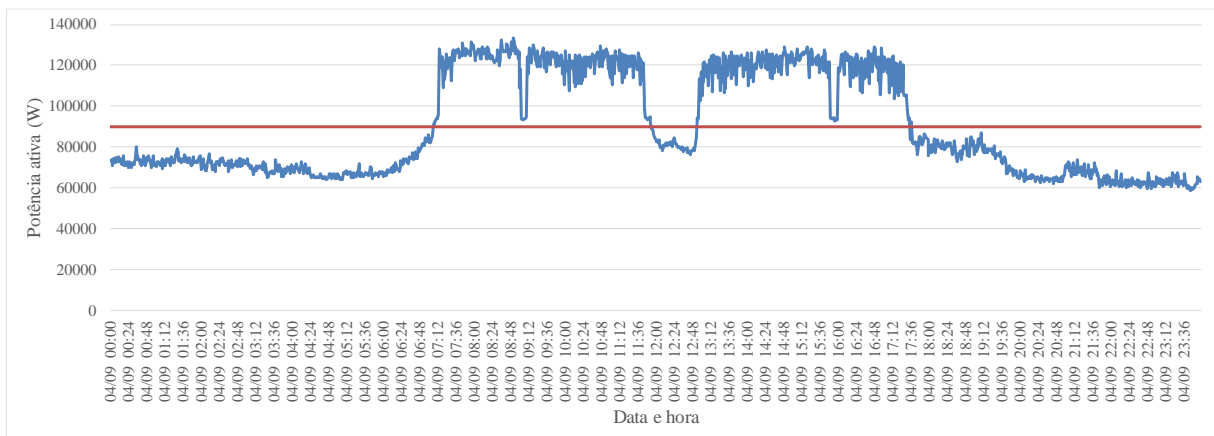
Para realizar o cálculo da redução total da potência da instalação 03 foram destacadas as medições dia 04/09/2018, conforme mostrado na Figura 32. No gráfico foi traçado a média da potência consumida no turno de trabalho que atingiu um patamar final de 90,15 kW (o esperado era de 48,83 kW), caracterizando assim uma média final de potência do sistema após a realização das ações de redução de consumo da instalação 03. O resultado final da redução de consumo foi de 9,48 kWh, ou seja, uma redução total de 9,5%, conforme as médias entre os valores coletados antes e após as intervenções realizadas.

Figura 31 – Potência total após intervenção



Fonte: Autor (2019).

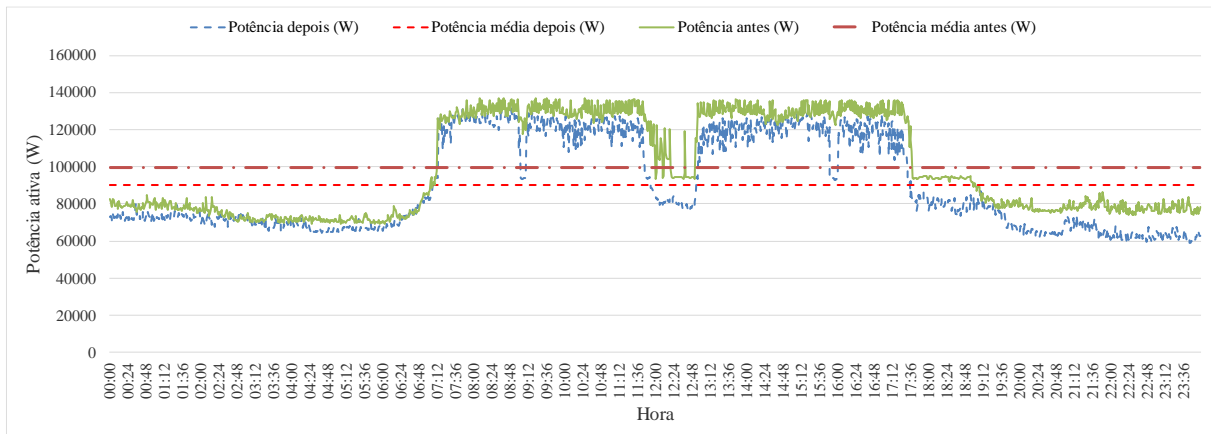
Figura 32 – Gráfico da potência ativa total do dia 04/09/2018 do sistema de ar comprimido da instalação 03



Fonte: Autor (2019).

A Figura 33 mostra a sobreposição dos gráficos das potências medidas da instalação 03 antes e depois das intervenções. A redução da potência média ao longo do dia de trabalho ficou evidente quando mostrado deste modo.

Figura 33 – Gráfico das potências antes x depois da instalação 03



Fonte: Autor (2019).

Com o intuito de mostrar um retorno financeiro para o projeto foi calculado a projeção de redução de custo, considerando que a instalação 03 opera 24 horas diárias, durante 22 dias por mês em 12 meses no ano. Para a avaliação do tempo de retorno do capital investido foi considerado o valor da tarifa elétrica de R\$ 0,42 por kWh consumido. O valor calculado para a redução de consumo anual foi de R\$ 25.227,72 (1291,37 UPF). A Tabela 16 mostra os valores calculados e a Tabela 17 apresenta os custos do projeto.

Tabela 16 – Resumo potência, consumo e custo antes x depois

Item	Antes	Depois	Diferença
Potência média	99,63 kW	90,15 kW	9,48 kW
Consumo mensal	52.604,64 kWh	47.599,20 kWh	5.005,44 kWh
Consumo anual	631.255,68 kWh	571.190,40 kWh	60.065,28 kWh
Custo anual	R\$ 265.127,38	R\$ 239.899,97	R\$ 25.227,72

Fonte: Autor (2019).

Tabela 17 – Custos do projeto

Item	Custo (R\$)
Diagnóstico	4.200,00
Mão de obra	300,00
Materiais	1.500,00
Total	6.000,00

Fonte: Autor (2019).

A mão de obra reportada na Tabela 17 considerou apenas o custo do funcionário nos horários utilizados para realizar as correções.

4.3.8 Análise de retorno do investimento (*payback* descontado)

Para realizar a análise do retorno deste investimento foi utilizada a técnica do *payback* descontado, onde este considera os valores dos fluxos de caixa, descontado os valores da taxa mínima de atratividade (TMA), de forma a verificar o prazo de recuperação do capital investido. O estudo foi baseado em um valor para a taxa mínima de atratividade (TMA) de 10% ao ano (0,833% ao mês), taxa indicada pela empresa da instalação 03. O estudo foi baseado em um fluxo de caixa para um período de 12 meses. O cálculo do retorno do investimento foi realizado tomando como base os valores mensais da economia gerada após as ações realizadas com relação ao custo total do projeto despendido pela empresa. Desta forma, os valores referentes ao custo total do projeto, valores de economia mensal e *payback* descontado para a instalação 03, pode ser visto na Tabela 18.

Tabela 18 – Retorno do investimento

Mês	Fluxo de caixa	Fluxo de caixa descontado	Saldo
0	-R\$ 6.000,00	-R\$ 6.000,00	-R\$ 6.000,00
1	R\$ 2.102,31	R\$ 2.084,94	-R\$ 3.915,06
2	R\$ 2.102,31	R\$ 2.067,70	-R\$ 1.847,36
3	R\$ 2.102,31	R\$ 2.050,62	R\$ 203,26
4	R\$ 2.102,31	R\$ 2.033,67	R\$ 2.236,93
5	R\$ 2.102,31	R\$ 2.016,86	R\$ 4.253,79
6	R\$ 2.102,31	R\$ 2.000,19	R\$ 6.253,98
7	R\$ 2.102,31	R\$ 1.983,66	R\$ 8.237,64
8	R\$ 2.102,31	R\$ 1.967,27	R\$ 10.204,91
9	R\$ 2.102,31	R\$ 1.951,01	R\$ 12.155,92
10	R\$ 2.102,31	R\$ 1.934,89	R\$ 14.090,81
11	R\$ 2.102,31	R\$ 1.918,90	R\$ 16.009,71
12	R\$ 2.102,31	R\$ 1.903,04	R\$ 17.912,74

Fonte: Autor (2019).

Com base nos dados da Tabela 18, é possível verificar que o retorno do investimento, calculado pelo método do *payback* descontado, deve ocorrer entre o segundo e o terceiro mês. A fração de mês pode ser obtida dividindo o saldo do décimo mês e o fluxo de caixa descontado

do décimo primeiro mês $[(-R\$ 1.847,36/R\$ 2.050,62) = 0,90]$. Sendo assim, o período do *payback* descontado foi de 2,9 meses. A partir dos dados da Tabela 18 também foram calculados os valores para a taxa interna de retorno (TIR) que ficou em 33,99% e da taxa interna de retorno modificada (MTIR) que ficou em 13,15%, comprovando a viabilidade financeira do projeto perante a TMA pré-estabelecida pela empresa.

4.4 SÍNTESE DOS RESULTADOS

Como forma de mensurar o resumo dos resultados nas três instalações foi elaborada a Tabela 19, na qual é mostrada que em todas as instalações houve ganhos de eficiência do sistema de ar comprimido através da redução do consumo médio de potência.

A Tabela 19 mostra que a redução da potência média da instalação 01 foi de 27,9%, devido a uma redução no índice de vazamentos que ficou em 91,7%. O índice de perda de carga não teve alteração devido a não intervenção na infraestrutura da rede pneumática, sendo que o ganho do índice de fornecimento ficou em 19,3%. As melhorias da instalação 01 foram obtidas com o *payback* descontado em 10,66 meses. O *payback* descontado obtido na instalação 01 não obteve melhor resultado pois a instalação tem seu regime de funcionamento de um turno de trabalho. Se a instalação 01 aumentar as horas de trabalho, a projeção de economia tende a ser maior do que a calculada.

Tabela 19 – Síntese dos resultados

Dados avaliados	Instalação 01		Instalação 02		Instalação 03	
	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final
Potência média (kW)	20,09	14,49	10,08	8,88	99,63	90,15
Redução média	27,9%		11,9%		9,5%	
Volume de vazamento (Nm ³ /min)	1,22	0,101	1,133	0,712	11,461	9,110
Redução de vazamento	91,7%		37,2%		20,5%	
Índice perda de carga	0,82	0,82	0,95	0,95	0,97	0,97
Redução de perda de carga	0,0%		0,0%		0,0%	
Índice de fornecimento	0,55	0,68	0,93	0,93	0,79	0,85
Ganho do índice de fornecimento	19,3%		0,0%		6,5%	
Payback descontado (meses)	10,66		22,09		2,9	

Fonte: Autor (2019)

A instalação 02 obteve uma redução da potência de 11,9% devido a uma redução no índice de vazamentos que ficou em 37,2%. O índice de perda de carga e o de fornecimento não sofreram alterações, pois já se encontravam em um valor aceitável. As melhorias da instalação 02 foram obtidas com o *payback* descontado de 22,09 meses. O *payback* descontado obtido foi o maior entre as três instalações devido à potência unitária do compressor de ar ser a menor e também devido ao fato de que o compressor da instalação é com rotação variável. Com isso, seu custo de operação é menor comparado a compressores de maiores potências e a compressores com característica de carga/alívio.

Da mesma forma a instalação 03 obteve uma redução da potência de 9,5% devido à redução no índice de vazamentos (20,5%). O índice de perda de carga não teve alteração, pois já estava com valor aceitável e o ganho do índice de fornecimento ficou em 6,5%. As melhorias da instalação 03 foram obtidas com o *payback* descontado de 2,9 meses, sendo o menor entre as três instalações analisadas pelo fato das potências dos compressores serem as maiores e também pelo regime da instalação ser de 24 horas.

Os percentuais de redução de vazamentos nas instalações 02 e 03 foram razoavelmente baixos, mas as ações de correção continuam em execução.

5 CONCLUSÕES

O trabalho teve como proposta principal a elaboração de um método para avaliar a eficiência global em sistemas de ar comprimido, sendo o mesmo aplicado em três instalações distintas. Como o método está organizado de modo a conduzir as ações em forma sequencial, explorando todos os problemas pertinentes à operação de sistemas de ar comprimido, a sua aplicação favorece ao usuário identificar o passo a passo para a elaboração de um plano de ação em eficiência energética. Ao aplicar o método foi possível avaliar todos os pontos relevantes no que diz respeito ao desperdício de energia, o qual serve como roteiro de avaliação das instalações e, em certos quesitos, ainda possui pontos analíticos de avaliação. Isso auxilia ainda mais nas tomadas de decisão por parte de quem está executando o método.

A utilização de analisadores de energia para avaliar as potências médias utilizadas é uma forma real de trazer o valor energético, não apenas trabalhando com potências nominais. Essas potências podem conduzir a erros de projeção, de modo a superestimar ou subestimar os resultados.

Na aplicação do método também é possível coletar informações relevantes como o volume de vazamentos, aplicando métodos específicos quando os compressores são de velocidade variável e carga/alívio. Assim como, avaliar as pressões de trabalho requeridas, pressão de fornecimento, as perdas de carga da rede e, a partir destas informações, montar planos de ação para realizar as adequações necessárias. Cada item avaliado possui uma projeção de redução de energia, podendo as projeções serem consideradas como metas a alcançar.

A aplicação do método na instalação 01 mostrou um potencial de redução do consumo de energia no valor de 7,87 kW de potência média (39,2%), porém, após a realização das ações, o ganho real foi de 5,60 kW (27,9%). Esse resultado mostra que a instalação 01 ainda tem o potencial de redução no consumo de energia de 2,27 kW na potência média do sistema de ar comprimido. Já na instalação 02 a aplicação do método projetou uma redução da potência média no valor de 4,99 kW (49,5%), sendo que após a implementação das ações a redução real medida foi de 1,20 kW (11,9%), ainda tendo um potencial de redução de 3,79 kW na potência média. A aplicação do método na instalação 03 projetou uma redução na potência média de 50,80 kW (51,0%), mas após a implementação das ações o resultado medido foi uma redução real de 9,48 kW (9,5%). A instalação 03 é a que apresenta a maior potencial de redução que foi de 41,32 kW. Ainda com relação a essa última instalação, houve uma redução no custo anual de

operação do sistema de ar comprimido de R\$ 25.227,72, maior montante economizado das três instalações analisadas.

Conforme mencionado no parágrafo anterior, todas as instalações ainda possuem grandes possibilidades de redução de consumo. Assim sendo, novas aplicações do método podem ser realizadas, atualizando os valores encontrados.

As atuações das correções sugeridas dependeram fortemente do corpo técnico das empresas. Isso fez que em todas elas houvesse certas dificuldades de execução dos passos do fluxograma proposto.

O processo de elaboração do método proposto neste trabalho proporcionou um aprimoramento profissional. Como consultor em eficiência energética, a elaboração do método para determinar a eficiência global em sistemas de ar comprimido fez com que muitos trabalhos de campo, além das instalações avaliadas nesta dissertação, obtivessem êxito ao longo da execução.

De forma a propor trabalhos futuros, através da experiência adquirida no decorrer da execução desta dissertação, abaixo sugere-se algumas questões para serem avaliadas:

- aplicar o método proposto em uma instalação experimental para avaliar as interações das ações de eficiência energética;
- realizar uma pré-avaliação da instalação, utilizando o método, para prover mais recursos financeiro, a fim de atingir êxito em todas as ações sugeridas;
- realizar a avaliação deste método em outros tipos compressores como alternativos, axiais, centrífugos, etc.;
- incrementar o método através da virtualização do mesmo, a fim de transformá-lo em uma aplicação.

REFERÊNCIAS

ABDELAZIZ, E.A.; SAIDUR, R.; MEKHILEF, S. A review on energy saving strategies in industrial sector. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s.l.], v. 15, n. 1, p.150-168, 2011.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Consumidores, Consumo, Receita e Tarifa média - Classe de Consumo: banco de dados**. 2016. Disponível em: <www.aneel.gov.br>. Acesso em: 21 out. 2016.

ASSAF NETO, A. **Finanças Corporativas e Valor**. 4. ed. São Paulo: Atlas S.a., 2009.

ASSAF NETO, A. **Matemática Financeira e suas aplicações**. São Paulo: Atlas S.A., 2016.

BONINI, M. R. Tarifas de energia elétrica: evolução nos últimos anos e perspectivas. **Boletim de Economia Fundap**, v. 8, p. 19–36, 2011.

BRASIL, PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA. Decreto Nº 4.508, de 11 de dezembro de 2002. **Diário Oficial da União**, n. D, p. 2002, 12 dez. 2002.

CNI: CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA. Uso eficiente de energia elétrica na indústria. 2014. 44 p. Disponível em: http://arquivos.portaldaindustria.com.br/app/conteudo_18/2014/04/22/6281/cartilha_cni_corrente_FINAL-small1.pdf>. Acesso em: 22 ago. 2018.

DAMODARAN, A **Finanças Corporativas Aplicadas - Manual do Usuário**. Porto Alegre: Bookman, 2002.

DINDORF, R. Estimating Potential Energy Savings in Compressed Air Systems. **Procedia Engineering**, [s.l.], v. 39, p.204-211, 2012.

DUDIĆ, S. et al. Leakage quantification of compressed air using ultrasound and infrared thermography. **Measurement**, [s.l.], v. 45, n. 7, p.1689-1694, 2012

DUFLOU, J. R. et al. Towards energy and resource efficient manufacturing: A processes and systems approach. **Cirp Annals**, [s.l.], v. 61, n. 2, p.587-609, 2012.

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

ELETROBRAS - CENTRAIS ELÉTRICAS BRASILEIRAS S.A. Pesquisa de posse de equipamentos e hábitos de uso - Classe industrial - Alta tensão - Relatório Brasil - Completo. Disponível em: <<http://www.procelinfo.com.br/>>. Acesso em: 5 agosto. 2018.

GHADIMI, P. et al. Integrated Material and Energy Flow Analysis towards Energy Efficient Manufacturing. **Procedia Cirp**, [s.l.], v. 15, p.117-122, 2014.

GODOI, J. M. A. **Eficiência energética industrial: um modelo de governança de energia para a indústria sob requisitos de sustentabilidade**. 2011. 126 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Energia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

HAN, J.; YUN, S.J. An analysis of the electricity consumption reduction potential of electric motors in the South Korean manufacturing sector. **Energy Efficiency**, [s.l.], v. 8, n. 6, p.1035-1047, 2015.

IEEE PES GENERAL MEETING TO BE HELD IN TAMPA, 2007, Florida. **Comments on Resource Adequacy in the Australian Competitive Electricity Industry**. Florida: IEEE, 2007. 4 p.

KASSAI, J.R. et al. **Abordagem Matemática e Contábil do Lucro Empresarial**. 2. ed. São Paulo: Atlas S.A., 2000. 280 p.

KUMAR, P. **Training Manual on Energy Efficiency for Small an Medium Enterprises**. Tokyo: Green Productivity, 2010. 139 p. 139 f.

LEITE, A. A. F.; BAJAY, S. V.; GORLA, F. D. **Oportunidades de Eficiência Energética para a Indústria: relatório setorial: ferros-ligas**. Brasília: CT Comunicação, 2010. 46 p.

LIAO, P. et al. Compressed air leak detection based on time delay estimation using a portable multi-sensor ultrasonic detector. **Measurement Science And Technology**, [s.l.], v. 24, n. 5, p.055102-055112, 2013.

MCKANE, A.; HASANBEIGI, A. Motor systems energy efficiency supply curves: A methodology for assessing the energy efficiency potential of industrial motor systems. **Energy Policy**, [s.l.], v. 39, n. 10, p.6595-6607, 2011.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA: MME; EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA:EPE. Balanço Energético Nacional 2018: ano base 2017. Brasília – DF. EPE, 2018. 294 p.

MOREIRA, S. G. **Estratégia de simulação para análise da eficiência energética em sistema de bombeamento monitorado via supervisório**. 2008. 106 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Campo Grande, 2008.

MOUSAVI, S.; KARA, S.; KORNFELD, B. Energy Efficiency of Compressed Air Systems. **Procedia Cirp**, [s.l.], v. 15, p.313-318, 2014.

NEALE, J. R.; KAMP, P. J. J. Compressed air system best practice programmes: What needs to change to secure long-term energy savings for New Zealand?. **Energy Policy**, [s.l.], v. 37, n. 9, p.3400-3408, 2009.

NEHLER, T.; PARRA, R.; THOLLANDER, P. Implementation of energy efficiency measures in compressed air systems: barriers, drivers and non-energy benefits. **Energy Efficiency**, [s.l.], v. 11, n. 5, p.1281-1302, 2018.

OLESKO, H. D. **UMA PROPOSTA DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA PARA SISTEMAS DE AR COMPRIMIDO INDUSTRIAIS**. 2013. 103 f. Monografia (Especialização) - Curso de Especialização em Eficiência Energética na Indústria, Departamento Acadêmico de Eletrotécnica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

O'RIELLY, K.; JESWIET, J. Strategies to Improve Industrial Energy Efficiency. **Procedia Cirp**, [s.l.], v. 15, p.325-330, 2014.

PRASHANTH, M. S. et al. A Multi Faceted Approach To Energy Conservation In Foundries. **Procedia Engineering**, [s.l.], v. 97, p.1815-1824, 2014.

ROCHA, N. R.; MONTEIRO, M. A. G. **Eficiência Energética em Sistemas de Ar Comprimido**. Rio de Janeiro: ELETROBRÁS. 2005. 208 p.

ROSS, S. A.; WESTERFIELD, R. W.; JAFFE, J. F. **Administração financeira: corporate finance**. São Paulo: Atlas, 2002. 776 p.

SAIDUR, R.; HASANUZZAMAN, M.; RAHIM, N. A. Energy, economic, and environmental analysis of the Malaysian industrial compressed-air systems. **Clean Technologies and Environmental Policy**, [s.l.], v. 14, n. 2, p.195-210, 2011.

SAIDUR, R.; RAHIM, N.A.; HASANUZZAMAN, M. A review on compressed-air energy use and energy savings. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s.l.], v. 14, n. 4, p.1135-1153, 2010.

SAUER, I.L. et al. A comparative assessment of Brazilian electric motors performance with minimum efficiency standards. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, [s.l.], v. 41, p.308-318, 2015.

SESLIJA, D. et al. Improving energy efficiency in compressed air systems - practical experiences. **Thermal Science**, [s.l.], v. 20, n. 2, p.355-370, 2016.

SOLA, A.V.H. **Fatores humanos como barreiras para eficiência energética em indústrias**. 2006. 118 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia de Produção, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2006.

SOLA, A.V.H.; MOTA, C.M.M.; KOVALESKI, J.L. A model for improving energy efficiency in industrial motor system using multicriteria analysis. **Energy Policy**, [s.l.], v. 39, n. 6, p.3645-3654, 2011.

TANAKA, K. Review of policies and measures for energy efficiency in industry sector. **Energy Policy**, [s.l.], v. 39, n. 10, p.6532-6550, 2011.

YANG, M. Air compressor efficiency in a Vietnamese enterprise. **Energy Policy**, [s.l.], v. 37, n. 6, p.2327-2337, 2009.

APÊNDICE A – LEITURA COMPARATIVA DOS ANALISADORES DE ENERGIA

Tabela 20 – Leitura dos analisadores de energia

(continua)

Data	Hora	Leituras analisador Embrasul (W)	Leituras analisador Exttech (W)	Leituras analisador Fluke (W)	Leituras analisador Minipa (W)	Média (W)	Mediana (W)	Desvio padrão (W)
26-jul	12:30	4535	4200	4380	4479	4398,39	4429,50	146,90
26-jul	12:31	4454	4200	4290	4469	4353,14	4371,77	130,31
26-jul	12:32	4406	4200	4260	4473	4334,69	4332,87	126,36
26-jul	12:33	4358	4300	4380	4392	4357,53	4369,06	40,84
26-jul	12:34	4482	4100	4440	4342	4341,11	4391,00	171,16
26-jul	12:35	4522	4200	4620	4414	4439,12	4468,24	180,25
26-jul	12:36	4793	4100	4620	4501	4503,38	4560,50	294,35
26-jul	12:37	4676	4200	4590	4514	4494,97	4552,00	207,47
26-jul	12:38	4672	4200	4410	4831	4528,26	4541,02	279,32
26-jul	12:39	4506	4100	4350	4683	4409,85	4428,21	247,34
26-jul	12:40	4476	4400	4380	4596	4463,05	4438,09	97,84
26-jul	12:41	4456	4400	4350	4416	4405,54	4408,00	43,92
26-jul	12:42	4427	4300	4380	4462	4392,34	4403,68	70,14
26-jul	12:43	4477	4300	4380	4424	4395,28	4402,00	74,91
26-jul	12:44	4465	4200	4320	4443	4356,92	4381,50	122,49
26-jul	12:45	4407	4100	4290	4466	4315,81	4348,61	161,40
26-jul	12:46	4377	4300	4290	4424	4347,71	4338,42	63,97
26-jul	12:47	4378	4200	4260	4367	4301,18	4313,50	85,87
26-jul	12:48	4365	4300	4680	4363	4427,01	4364,01	171,34

(continuação)

Data	Hora	Leituras analísador Embrasul (W)	Leituras analísador Extech (W)	Leituras analísador Fluke (W)	Leituras analísador Minipa (W)	Média (W)	Mediana (W)	Desvio padrão (W)
26-jul	12:49	4829	4100	4950	4355	4558,51	4592,03	399,21
26-jul	12:50	5115	4100	5730	4583	4881,94	4848,87	701,00
26-jul	12:51	5874	4200	5760	4956	5197,43	5358,00	780,38
26-jul	12:52	5886	4600	5880	5600	5491,46	5740,00	609,09
26-jul	12:53	5983	4700	5880	5867	5607,57	5873,50	607,28
26-jul	12:54	5986	5600	6180	5960	5931,54	5973,09	241,83
26-jul	12:55	6326	5600	6510	6013	6112,26	6169,53	398,40
26-jul	12:56	6590	5600	6420	6116	6181,49	6268,00	434,41
26-jul	12:57	6495	5700	6330	6644	6292,20	6412,40	415,11
26-jul	12:58	6463	5700	6570	6639	6342,94	6516,38	434,72
26-jul	12:59	6694	6300	6660	6483	6534,23	6571,50	181,48
26-jul	13:00	6808	6300	6720	6622	6612,50	6671,00	221,76
26-jul	13:01	6831	6200	6720	6835	6646,56	6775,63	302,45
26-jul	13:02	6795	6400	6720	6883	6699,58	6757,66	210,54
26-jul	13:03	6810	6600	6780	6892	6770,52	6795,03	123,14
26-jul	13:04	6896	6500	6720	6890	6751,50	6805,00	186,46
26-jul	13:05	6837	6600	6720	6947	6776,07	6778,63	149,56
26-jul	13:06	6824	6500	6720	6929	6743,28	6772,07	183,26
26-jul	13:07	6856	6600	6810	6887	6788,37	6833,25	129,51
26-jul	13:08	6955	6500	6870	6896	6805,26	6883,00	206,59
26-jul	13:09	6974	6600	6810	6947	6832,73	6878,50	170,95
26-jul	13:10	6927	6600	6840	7056	6855,87	6883,73	192,27
26-jul	13:11	6974	6800	6810	6987	6892,69	6891,88	101,48

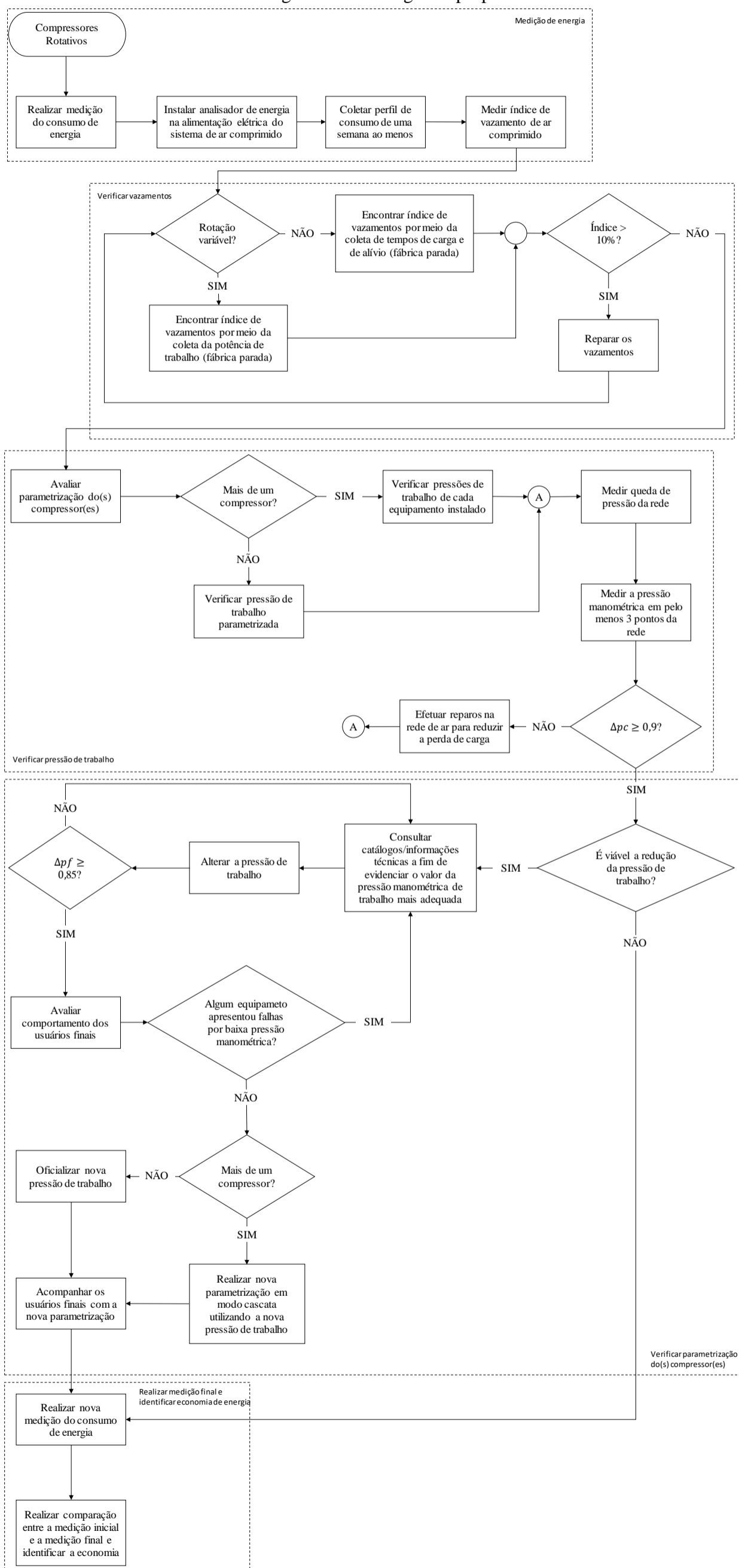
(continuação)

Data	Hora	Leituras analisador Embrasul (W)	Leituras analisador Extech (W)	Leituras analisador Fluke (W)	Leituras analisador Minipa (W)	Média (W)	Mediana (W)	Desvio padrão (W)
26-jul	13:12	6940	6700	6900	7016	6888,92	6919,84	134,83
26-jul	13:13	7033	6700	7260	6994	6996,64	7013,27	229,96
26-jul	13:14	7367	6700	7080	7045	7048,04	7062,50	273,25
26-jul	13:15	7194	6600	6840	7243	6969,27	7017,03	304,70
26-jul	13:16	6930	6700	6720	7415	6941,24	6824,98	332,53
26-jul	13:17	6857	6900	6810	7153	6930,07	6878,63	153,10
26-jul	13:18	6939	7000	6810	6893	6910,50	6916,00	80,06
26-jul	13:19	6947	6600	6840	6961	6836,99	6893,49	166,98
26-jul	13:20	6946	6500	6780	6985	6802,81	6863,11	220,59
26-jul	13:21	6912	6700	6900	7018	6882,57	6906,13	132,74
26-jul	13:22	7020	6700	6930	6959	6902,33	6944,50	140,04
26-jul	13:23	7014	6700	6870	7038	6905,51	6942,02	155,81
26-jul	13:24	6982	6600	7080	7093	6938,76	7031,02	231,21
26-jul	13:25	7214	6700	6930	7070	6978,38	7000,00	218,73
26-jul	13:26	7061	6700	6870	7231	6965,62	6965,74	230,44
26-jul	13:27	6986	6700	6900	7123	6927,34	6943,19	177,20
26-jul	13:28	7030	7300	6960	7099	7097,14	7064,29	146,66
26-jul	13:29	7093	6800	6960	7049	6975,51	7004,50	129,43
26-jul	13:30	7074	6700	6960	7107	6960,16	7016,82	184,50

Fonte: Autor (2019).

APÊNDICE B – FLUXOGRAMA

Figura 34 – Fluxograma proposto



Fonte: Autor (2019).