



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

MATHEUS HENRIQUE VENTURA FERREIRA

**ANÁLISE DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM CENTRAL DE AR COMPRIMIDO
INDUSTRIAL**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Recife – PE

2023

MATHEUS HENRIQUE VENTURA FERREIRA

**ANÁLISE DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM CENTRAL DE AR COMPRIMIDO
INDUSTRIAL**

Trabalho apresentado ao curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco - UFPE, como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. MSc. Luiz Adeildo da Silva Júnior

Recife – PE

2023

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Ferreira, Matheus Henrique Ventura.

Análise de eficiência energética em central de ar comprimido / Matheus Henrique Ventura Ferreira. - Recife, 2023.

79 p. : il., tab.

Orientador(a): Luiz Adeildo da Silva Júnior

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia Mecânica - Bacharelado, 2023.

Inclui referências, anexos.

1. Ar comprimido. 2. Potência específica. 3. Geração de ar comprimido. 4. Eficiência energética. 5. Compressores de ar. I. Silva Júnior, Luiz Adeildo da. (Orientação). II. Título.

680 CDD (22.ed.)

MATHEUS HENRIQUE VENTURA FERREIRA

**ANÁLISE DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM CENTRAL DE AR COMPRIMIDO
INDUSTRIAL**

Trabalho apresentado ao curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco - UFPE, como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Aprovado em: 08 / 05 / 2023.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Prof. MSc. Luiz Adeildo da Silva Júnior (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Francisco Espedito de Lima (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Filipe Stephan de Souza Virgolino (Examinador Externo)
Universidade de Pernambuco

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar à Deus, por sempre estar do meu lado, me dando força e saúde para superar as dificuldades dessa jornada. Em segundo lugar a Nsa. Senhora e ao espírito santo por me interceder e me dar sabedoria.

À minha mãe, Luiza Ventura, que foi a pessoa que mais lutou pela minha educação e acreditou em mim o tempo todo.

À minha esposa, Jakellyne Ventura, pela cumplicidade e por estar sempre ao meu lado nessa caminhada.

Aos meus familiares que desde o início torceram por mim e me deram força.

Aos meus amigos, que me ajudaram, me apoiaram e estão sempre ao meu lado quando preciso.

Ao meu Professor Orientador Luiz Adeildo por ter acreditado na construção deste projeto, pelos conhecimentos técnicos a mim repassados e pela confiança.

Ao Engenheiro especialista em ar comprimido, Jumas Jacques de Moraes, por todo apoio e conhecimento fornecido para realização deste trabalho.

RESUMO

O presente trabalho de monografia descreve uma análise e melhoria de eficiência energética em uma central de ar comprimido industrial. Primeiramente será apresentado como foi realizado o trabalho de campo que possibilitou levantar as informações dos equipamentos que compõe a antiga central compressores, características do sistema de ar comprimido, medição de vazão, pressão e energia elétrica no período recomendado pela bibliografia de referência para encontrar o perfil detalhado de consumo do ar comprimido. Em seguida será apresentada a análise de eficiência energética com base nos dados levantados para especificação dos novos equipamentos da geração que atendessem a demanda de ar comprimido da fábrica para atingir valores de “*benchmarking*” do consumo específico, isto é, a quantidade de quilowatt-hora para cada metro cúbico de ar produzido, servindo como um dos principais indicadores de eficiência energética em sistema de ar comprimido. Após a implementação dos novos equipamentos foi realizada uma segunda medição do perfil de consumo para verificar o ganho real obtido. Por fim foi realizado uma nova avaliação do retorno do investimento trazendo um comparativo de custo de energia elétrica e os *paybacks* previsto, real e o aceitável pela fábrica. Foi obtido uma redução de 33,43% de economia com energia elétrica para operação dos compressores, resultando um *save* anual de R\$ 568.342,51 com o *payback* de 3,06 anos para condições normais de operação da indústria em estudo.

Palavras chaves: Eficiência energética, central de ar comprimido, vazão de consumo, potência específica.

ABSTRACT

This monograph describes an analysis and improvement of energy efficiency in an industrial compressed air plant. Firstly, it will be presented how the fieldwork was carried out, which made it possible to collect information on the equipment that made up the old central compressors, characteristics of the compressed air system, flow measurement, pressure and electrical energy in the period recommended by the reference bibliography to find the profile detailed compressed air consumption. Next, the energy efficiency analysis will be presented based on the data collected for the specification of new generation equipment that would meet the compressed air demand of the factory to achieve benchmarking values of specific consumption, that is, the amount of kilowatt-hour for each cubic meter of air produced, serving as one of the main indicators of energy efficiency in compressed air systems. After the implementation of the new equipment, a second measurement of the consumption profile was carried out to verify the real gain obtained. Finally, a new evaluation of the return on investment was carried out, bringing a comparison of the cost of electricity and the expected, actual and acceptable paybacks by the factory. A 33.43% reduction in electricity savings was obtained for operating the compressors, resulting in annual savings of R\$ 568,342.51 with a payback of 3.06 years for normal operating conditions in the industry under study.

Keywords: Energy efficiency, compressed air plant, consumption flow, specific power.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema de ar comprimido industrial	14
Figura 2 - Tipos de Compressores.....	15
Figura 3 - Compressor de Pistão	16
Figura 4 - Compressor de Parafuso	17
Figura 5 - Compressores de Parafuso de Dois Estágio	18
Figura 6 - Compressor Scroll	19
Figura 7 - Compressor Radial	20
Figura 8 - Compressor Axial.....	21
Figura 9 - Seleção de Compressores	23
Figura 10 - Esquemático Sistema de Medição	25
Figura 11 - Etapas do trabalho	30
Figura 12–Fluxograma Central de Ar (1° Avaliação)	31
Figura 13 - Medição da vazão do perfil de consumo.	37
Figura 14 - Fluxograma da nova central de compressores.....	40
Figura 15 - Gráfico da Utilização dos Compressores da Nova Central	41
Figura 16 - Comparativo consumo de energia	44
Figura 17 - Comparativo do custo de energia	45
Figura 18 - Comparativo dos paybacks.....	45
Figura 19 - Medição da Pressão e Vazão da Central Principal (1° dia)	50
Figura 20 - Medição da Potência (1° dia)	50
Figura 21 - Medição da Pressão e Vazão da Central Principal (2° dia)	51
Figura 22 - Medição da Potência (2° dia)	51
Figura 23 - Medição da Pressão e Vazão da Central Principal (3° dia)	52
Figura 24 - Medição da Potência (3° dia).	52
Figura 25 - Medição da Pressão e Vazão da Central Principal (4° dia)	53
Figura 26 - Medição da Potência (4° dia)	53
Figura 27 - Medição da Pressão e Vazão da Central Principal (5° dia)	54
Figura 28 - Medição da Potência (5° dia).....	54
Figura 29 - Medição da Pressão e Vazão da Central Principal (6° dia)	55
Figura 30 - Medição de Potência (6° dia)	55
Figura 31 - Medição da Pressão e Vazão da Central Principal (7° dia)	56
Figura 32 - Medição de Potência (7° dia)	56
Figura 33 - Medição da Pressão e Vazão da Central Secundária (1° dia).....	57
Figura 34 - Medição de Potência da Central Secundária (1° dia)	57
Figura 35 - Medição da Pressão e Vazão da Central Secundária (2° dia).....	58
Figura 36 - Medição de Potência da Central Secundária (2° dia)	58
Figura 37 - Medição da Pressão e Vazão da Central Secundária (3° dia).....	59
Figura 38 - Medição de Potência da Central Secundária (3° dia)	59
Figura 39 - Medição da Pressão e Vazão da Central Secundária (4° dia).....	60
Figura 40 - Medição de Potência da Central Secundária (4° dia)	60
Figura 41 - Medição da Pressão e Vazão da Central Secundária (5° dia).....	61
Figura 42 - Medição de Potência da Central Secundária (5° dia)	61
Figura 43 - Medição da Pressão e Vazão da Central Secundária (6° dia).....	62
Figura 44 - Medição de Potência da Central Secundária (6° dia)	62
Figura 45 - Medição da Pressão e Vazão da Central Secundária (7° dia).....	63

Figura 46 - Medição de Potência da Central Secundária (7° dia)	63
Figura 47 - Medição da Pressão e Vazão do ZR 5 (1° dia)	64
Figura 48 - Medição de Potência do ZR 5 (1° dia)	64
Figura 49 - Medição da Pressão e Vazão do ZR 5 (2° dia)	65
Figura 50 - Medição de Potência do ZR 5 (2° dia)	65
Figura 51 - Medição da Pressão e Vazão do ZR 5 (3° dia)	66
Figura 52 - Medição de Potência do ZR 5 (3° dia)	66
Figura 53 - Medição da Pressão e Vazão do ZR 5 (4° dia)	67
Figura 54 - Medição de Potência do ZR 5 (4° dia)	67
Figura 55 - Medição da Pressão e Vazão do ZR 5 (5° dia)	68
Figura 56 - Medição de Potência do ZR 5 (5° dia)	68
Figura 57 - Medição da Pressão e Vazão do ZR 5 (6° dia)	69
Figura 58 - Medição de Potência do ZR 5 (6° dia)	69
Figura 59 - Medição da Pressão e Vazão do ZR 5 (7° dia)	70
Figura 60 - Medição de Potência do ZR 5 (7° dia)	70
Figura 61 - Medição da Pressão e Vazão da Nova Central (1° dia)	71
Figura 62 - Medição de Potência da Nova Central (1° dia)	71
Figura 63 - Medição da Pressão e Vazão da Nova Central (2° dia)	72
Figura 64 - Medição de Potência da Nova Central (2° dia)	72
Figura 65 - Medição da Pressão e Vazão da Nova Central (3° dia)	73
Figura 66 - Medição de Potência da Nova Central (3° dia)	73
Figura 67 - Medição da Pressão e Vazão da Nova Central (4° dia)	74
Figura 68 - Medição de Potência da Nova Central (4° dia)	74
Figura 69 - Medição da Pressão e Vazão da Nova Central (5° dia)	75
Figura 70 - Medição de Potência da Nova Central (5° dia)	75
Figura 71 - Medição da Pressão e Vazão da Nova Central (6° dia)	76
Figura 72 - Medição de Potência da Nova Central (6° dia)	76
Figura 73 - Medição da Pressão e Vazão da Nova Central (7° dia)	77
Figura 74 - Medição de Potência da Nova Central (7° dia)	77
Figura 75 - Medição da Pressão e Vazão da Nova Central (8° dia)	78
Figura 76 - Medição de Potência da Nova Central (8° dia)	78

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Uso do ar comprimido industrial.....	12
Tabela 2 - Dados da Central Principal.....	33
Tabela 3 - Considerações sobre o regime de operação da central de ar principal.....	34
Tabela 4 - Potência Específicas da Sistema Atual	35
Tabela 5 - Vazões do Sistema Antes da Melhoria.....	35
Tabela 6 - Consumo Energético do Sistema Antes da Melhoria.....	36
Tabela 7 - Custo de Energia Antes da Melhoria	36
Tabela 8 - Dados Técnicos do Novo Sistema.....	39
Tabela 9 - Potência Específica da Central de Ar Depois da Melhoria	42
Tabela 10 - Leitura das Vazão de Ar Depois da Melhoria	42
Tabela 11 - Consumo de Energia da Central de Ar Depois da Melhoria	43
Tabela 12 - Custo de Energia Antes da Melhoria	43

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
1.1 Contextualização	11
1.2 Justificativa	13
1.3 Objetivos	13
1.3.1 Objetivos Principais	13
1.3.2 Objetivos específicos.....	14
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	14
2.1 Sistema Genérico de Ar Comprimido	14
2.3 Central de ar comprimido.....	15
2.4 Compressores	15
2.4.1 Compressor alternativo de pistão	16
2.4.2 Compressor de parafuso	17
2.4.3 Compressor de parafuso de dois estágios.....	18
2.4.4 Compressor scroll.....	19
2.4.5 Compressor de palhetas.....	20
2.4.6 Compressor radial	20
2.4.7 Compressor axial.....	21
2.4.8 Especificação dos compressores	22
2.4.9 Dimensionamento do Compressor	22
2.4.10 Condições do local de instalação do compressor	23
2.4.11 Qualidade do ar de entrega do compressor	24
2.5 Medição do perfil de consumo	24
2.6 Parâmetros de benchmarking para eficiência energética do ar comprimido	26
2.6.1 Custo do ar comprimido	26
2.6.2 Custo anual do compressor trabalhando em carga	27
2.6.3 Custo Anual do Compressor Trabalhando em Vazio	27
2.6.4 Custo Anual de Geração de Ar Comprimido	28
2.6.5 Custo específico do ar comprimido.....	28
2.7 Avaliação financeira do retorno do investimento.....	28
2.7.1 Retorno sobre o investimento (ROI)	29
2.7.2 Prazo de retorno do investimento (payback).....	29
3 METODOLOGIA	30
4 DESENVOLVIMENTO	32
4.1 Antes da melhoria	32

4.1.1 Primeira medição.....	32
4.1.2 Análise da primeira medição.....	34
4.1.3 Análise dos gráficos.....	36
4.1.4 Análise de outros fatores.....	37
4.1.5 Considerações sobre os vazamentos.....	38
4.2 Elaboração da nova central de ar comprimido.....	38
4.2.1 Novo arranjo da central de compressores.....	39
4.2.2 Previsão do retorno do investimento.....	40
4.5 Análise do Sistema depois da melhoria.....	41
4.5.1 Medição da nova central de compressores.....	41
4.5.2 Análise dos resultados obtidos da nova central.....	41
4.5.3 Comparação dos resultados.....	43
4.5.3.1 Comparação no consumo de energia.....	44
4.5.3.2 Comparação do custo de energia elétrica.....	44
4.5.3.3 Comparação do payback.....	45
5 CONCLUSÃO.....	46
6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	47
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	48
ANEXO A – Gráficos da Geração de Ar Comprimido da Central Principal.....	50
ANEXO B – Gráficos da Geração de Ar Comprimido da Central Secundária.....	57
ANEXO C – Gráficos da Geração de Ar Comprimido Compressor ZR 5.....	64
ANEXO D – Gráficos da Geração da Nova Central de Ar Comprimido.....	71
ANEXO E – Tabela-resumo de dados.....	79

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

A preocupação com a melhoria de eficiência energética é um desafio técnico enfrentado nas indústrias, atualmente existem muitas delas com departamentos específicos voltado para reduzir o consumo energético da planta para produzir mais com menos energia. Dados do Atlas da Eficiência Energética do Brasil 2020, mostram que, de 2005 a 2019, nosso país ficou 14% mais eficiente energeticamente. Os maiores índices estão nos setores de transporte e residencial, com 19% e 20% de aumento de eficiência energética, respectivamente. O setor industrial está logo atrás, com uma melhora de 7%.

Existem no Brasil o Programa de Eficiência Energética ou (PEE) desenvolvido e gerenciado pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) com o objetivo de estender as ações de conservação de energia. Dentre os programas pode-se destacar: o Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL) que promove o uso eficiente da energia elétrica e combate seu desperdício; o Programa Nacional de Racionalização do Uso dos Derivados do Petróleo e do Gás Natural (CONPET) criado pela Petrobrás que fomenta a racionalização e a eficiência no consumo de derivados de petróleo e gás natural (EPE, 2016); o Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE) coordenado pelo Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade de Industrial (INMETRO) que fornecem informações sobre o desempenho dos produtos para que os consumidores realizem compras conscientes.

As ações de Eficiência Energética (AEE's) é uma implementação direta no sistema que o deixará mais eficiente ao seu estado anterior podendo ser empregadas em diversos segmentos, como por exemplo, nos sistemas de força motriz, em sistemas de recuperação de calor, nos sistemas de refrigeração, sistemas de bombeamento em sistemas de geração do ar comprimido. A produção do ar comprimido é bastante dispendiosa para a fábrica podendo aumentar significativamente o custo de produção, tornando o produto menos competitivo no mercado, logo existem diversas AEE's de economia de energia, como pode-se destacar: troca de compressores por versões mais modernas, redução na queda por pressão, melhoria dos acionamentos (motores de alta eficiência), uso de sistemas de controle e recuperação do calor rejeitado.

De Maneira geral, ar comprimido é usado amplamente na indústria como fonte de energia para acionamento há mais de um século, sendo, frequentemente, considerado como a “quarta utilidade” de acordo com ANEEL. Encontramos ar comprimido em quase todos os seguimentos industriais apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Uso do ar comprimido industrial

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

Fonte: Adaptado de US DOE, 2016

O uso do ar comprimido é justificado por existir diversas vantagens sendo as principais: segurança operacional, flexibilidade, eliminação do risco de choques elétricos. O fato de ser mais flexível permite a utilização de equipamentos em áreas remotas, além de que as ferramentas pneumáticas são mais leves em comparação as elétricas, podendo trabalhar com velocidades e torques variáveis.

De acordo com Cavalcanti (2003, p.01) o custo operacional anual com compressores de ar, secadores e equipamentos auxiliares pode corresponder até 70% da conta de energia elétrica da indústria. Como consequência, grande parte do custo de fabricação pode ser atribuído ao ar comprimido, evidenciando que grande potencial de energia pode, também, existir em sistemas de ar comprimido.

Em várias indústrias o ar comprimido pode ser classificado como a energia mais cara utilizada, por isso é importante que seu uso seja realizado da forma correta e não dispendiosa. De acordo com Atlas Copco (2020, ONLINE) o custo equivalente do ar comprimido pode ser de 7 a 8 vezes o da eletricidade. Isso ocorre devida a grande quantidade de transformações de energia necessária para se obtê-la, sem contar com a quantidade que é desperdiçada, como por exemplo vazamentos.

Com base nesse contexto, estudos de eficiência energética em sistema de ar comprimido contribuem para aumentar a competitividade do setor industrial no Brasil além de racionalizar os impactos ambientais. Esse trabalho realiza um estudo de caso de eficiência energética em uma central de ar comprimido industrial.

1.2 Justificativa

Este trabalho tem como pergunta de pesquisa impulsionadora:

Como realizar uma análise de substituição da central de ar comprimido com base no perfil de consumo para alcançarmos números de "benchmarking" em termos de eficiência energética?

Tendo visto que o ar comprimido é uma energia bastante utilizada nas indústrias e seu custo operacional é bastante elevado, é de extrema importância estudar como podemos reduzir o seu consumo de forma a trazer ganhos energéticos para empresa, principalmente numa época que estamos preocupados com a escassez de recursos, impactos ambientais e encontrar alternativas econômicas.

1.3 Objetivos

Nesta seção serão apresentados os objetivos gerais e específicos desta monografia.

1.3.1 Objetivos Principais

Analisar o perfil de consumo de ar comprimido de uma indústria e especificar novos compressores para que possam alcançar ou assumir valores de "benchmarking" em termos de potência específica na produção de ar comprimido.

1.3.2 Objetivos específicos

- Medição do perfil de consumo da central de ar comprimido.
- Especificação de compressores.
- Redução da potência específica do ar comprimido.
- Análise do payback.

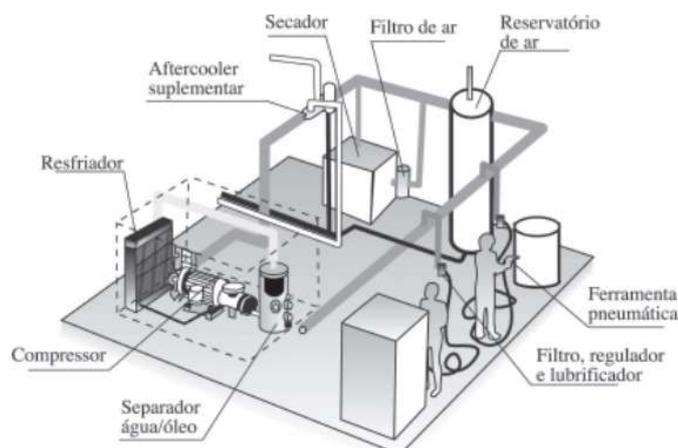
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesta etapa serão apresentados conceitos elementares do ar comprimido, tipos de equipamentos encontrados na geração, parâmetros de benchmarking, análise de custo operacional dos compressores, análise do retorno de investimento do projeto.

2.1 Sistema Genérico de Ar Comprimido

O ar comprimido é o ar atmosférico encontrado acima da pressão atmosférica, ele é um gás incolor, inodoro e não inflamável. Sua obtenção é dada pelo processo de conversão de energia elétrica em energia mecânica realizado pelo conjunto moto-compressor. Um sistema típico de ar comprimido industrial, visto na figura 1, é dividido em três subsistemas: a central de ar comprimido que é o espaço físico onde fica instalado os equipamentos que produz, trata e armazena; o sistema de distribuição que tem função do transportar o gás; e a sistema de uso final que seria os equipamentos consumidores como ferramentas pneumáticas, atuadores, operações com sopro entre outros, de acordo com Procell (2015).

Figura 1 – Esquema de ar comprimido industrial



Fonte: PROCEL (2005)

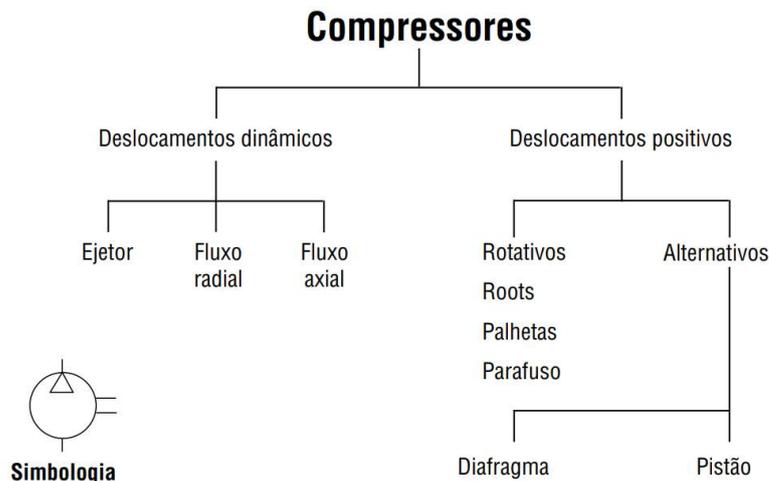
2.3 Central de ar comprimido

A central de ar comprimido é conhecida comumente por casa dos compressores, geralmente é localizada no setor de utilidades industriais fora da área de processo. Nela encontramos os equipamentos responsáveis pela geração, tratamento e armazenamento do ar comprimido (compressores, secadores, filtros e tanques pulmão). É desejável que a central de ar comprimido esteja em um local seco, arejado, livre de poluição ambiental (poeira, gases, ruídos gerados e etc.). Devemos ter alguns cuidados na seleção do "layout" dos equipamentos da central de ar comprimido, respeitando limites entre os espaços disponíveis para manutenção e operação. É necessário que a sala onde está instalada a central de ar comprimido tenha ambiente sem elevadas temperaturas e que não seja contaminado com produtos químicos, fumaça ou pós em suspensão, de acordo com Procell (2015).

2.4 Compressores

Compressores são máquinas destinadas a elevar a pressão de certo volume de ar, admitido nas condições atmosféricas, até uma determinada pressão, exigidas na execução dos trabalhos a serem realizados pelo ar comprimido (TECNOLOGIA PNEUMÁTICA PARKER, 2007). Existem dois princípios básicos (Figura 2) para a compressão de ar (ou gás): compressão por deslocamento positivo e compressão dinâmica. Os compressores de deslocamento positivo podem ser exemplificados como compressores alternativos (pistão), compressores rotativos de parafusos, compressores orbitais (scroll), compressores de palhetas. (MANUAL DO AR COMPRIMIDO, 2004).

Figura 2 - Tipos de Compressores



Fonte: Parker (2007)

Na compressão de deslocamento positivo baseia-se fundamentalmente na redução do volume. O ar é admitido em uma câmara isolada do meio exterior, onde seu volume é gradualmente diminuído, processando-se a compressão (PARKER, 2006, p.11). É visto na figura 2 que esse método de compressão é utilizado em compressores de pistão, parafuso, rotativos, diafragma e palhetas. Os compressores de parafusos assimétricos aprisionam o ar entre os lóbulos e reentrâncias do par de parafusos e são comprimidos. Os compressores de palhetas aprisionam o ar entre as palhetas e reduz o volume, resultando no aumento da pressão.

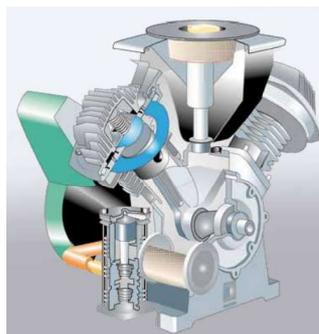
Nos compressores dinâmicos, a elevação da pressão é obtida por meio da conversão de energia cinética em energia de pressão, durante a passagem do ar através do compressor. Este ar é acelerado, atingindo velocidades elevadas e conseqüentemente os impulsores transmitem energia cinética ao ar. Posteriormente, seu escoamento é retardado por meio de difusores, obrigando a uma elevação na pressão (PARKER, 2006, p.11).

2.4.1 Compressor alternativo de pistão

O compressor de pistão (Figura 3) é o mais antigo e comum de todos os compressores industriais podendo ser de ação simples ou dupla, lubrificado a óleo ou variantes sem óleo, de somente um cilindro ou com vários números de cilindros em diferentes configurações. Com exceção de compressores muito pequenos com cilindros verticais, a configuração em V é a mais comum. Em compressores grandes de dupla ação, a configuração L com um cilindro vertical de baixa pressão e cilindro horizontal de alta pressão oferece benefícios da facilidade mecânica e se tornou o projeto mais comum (MANUAL ATLAS COPCO, 2015).

Compressores de pistão lubrificados a óleo normalmente funcionam com lubrificação por salpico, lubrificação forçada por diferença de pressão ou micro gotejamento na câmara de compressão. Normalmente os compressores têm válvulas de ação automática para admissão e descarga acionadas por diferença de pressão (MANUAL ATLAS COPCO, 2015).

Figura 3 - Compressor de Pistão



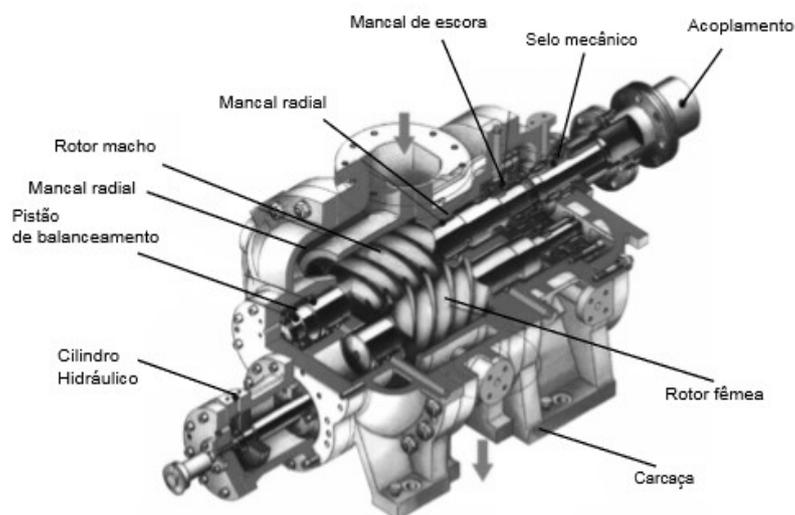
Fonte: Atlas Copco (2015)

2.4.2 Compressor de parafuso

Atualmente o compressor de parafuso é o mais encontrado na indústria de transformação por conseguir atender uma vasta gama de vazões trabalhando numa pressão entre 6 e 12 bar. O compressor de parafuso difere do compressor de pistão em vários aspectos, com destaque para a eficiência energética e a capacidade de operar continuamente em plena carga. Segundo Atlas Copco (2020, ONLINE) são três fatores que contribuem para vantagem do para o compressor de parafuso gastar menos energia comparado ao compressor de pistão: maior vazão efetiva, menor potência e banda de pressão variável.

Este compressor (Figura 4) é dotado de uma carcaça onde giram dois rotores helicoidais em sentidos opostos. Um dos rotores possui lóbulos convexos, o outro umas depressões ou reentrâncias côncavas e são denominados, respectivamente, rotor macho e rotor fêmea. O rotor fêmeo é acionado pelo rotor maço sem se tocarem e os compressores isentos de óleo são sincronizados por meio de engrenagens. O processo mais comum é acionar o rotor macho, obtendo-se uma velocidade menor do rotor fêmea. Estes rotores estão instalados numa carcaça cuja superfície interna consiste em dois cilindros ligados na configuração semelhante ao número "oito". Nas extremidades da câmara existem aberturas para admissão e descarga do ar (TECNOLOGIA PNEUMÁTICA PARKER, 2007).

Figura 4 - Compressor de Parafuso



Fonte: Noções Básicas de Ar Comprimido (2006)

2.4.3 Compressor de parafuso de dois estágios

O compressor de parafuso com dois estágios (Figura 5) de compressão é um modelo utilizado em aplicações que se deseja obter maiores ganhos de eficiência energética, porém seu custo de aquisição e manutenção é superior em relação ao compressor de parafuso de simples estágio. Na maioria dos estudos realizados para fazer a substituição de compressores de simples para duplo estágio se torna mais viável a utilização de duplo estágio quando é considerado a diferença do consumo de energia ao longo do tempo, que pode chegar até 10% segundo pesquisa realizada com engenheiros especialistas e comparativo de catálogos.

A aplicação de compressores de duplo estágio se torna ainda mais eficiente em máquinas de grande porte ou quando é desejável reduzir a quantidade de compressores para compressores de maiores porte de maior eficiência.

O seu princípio de funcionamento é semelhante ao compressor de parafuso de simples estágio, citado anteriormente, porém para se obter o ar na pressão final desejada, o ar capitado na atmosfera é submetido a passar por duas unidades compressoras com resfriamento entre os estágios, como ilustra a figura 5. Esse processo de compressão dividido em dois estágios faz com que se tenha menores taxa de compressão para cada estágio, o que aumenta a confiabilidade, vida útil dos rolamentos e maior eficiência em forma de pressão.

Figura 5 - Compressores de Parafuso de Dois Estágio



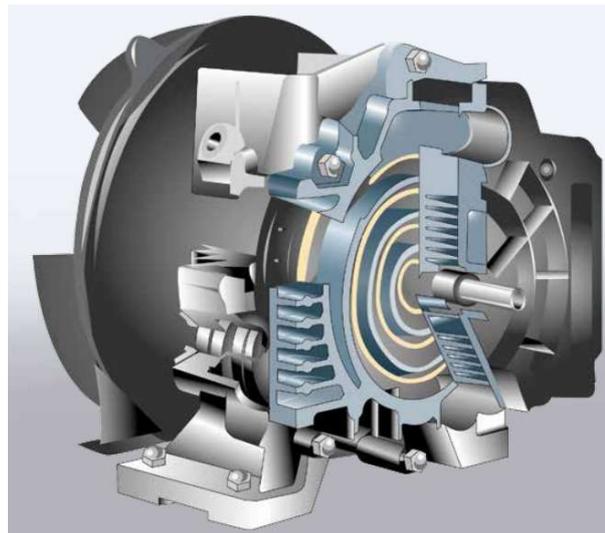
Fonte: Ingersoll Rand (2018)

2.4.4 Compressor scroll

Um compressor scroll (Figura 6) é um tipo de compressor isento de óleo, isto é, comprime uma quantidade específica de ar em um volume continuamente decrescente. O elemento compressor consiste em uma espiral de estator fixada em um alojamento e um excêntrico motorizado, espiral em órbita. As espirais são montadas com deslocamento de fase de 180° para formar bolsas de ar com um volume gradualmente variável. Isso fornece aos elementos de rolagem estabilidade radial. O vazamento é minimizado porque a pressão a diferença nas bolsas de ar é menor do que a diferença de pressão entre a entrada e a saída (MANUAL ATLAS COPCO, 2015).

A espiral orbital é impulsionada por um curso curto virabrequim e gira excentricamente em torno do centro da espiral fixa. A entrada está situada no topo da carcaça do elemento. Quando a espiral orbital se move, o ar é puxado para dentro e capturado em uma das bolsas de ar, onde é comprimido gradualmente enquanto se move em direção ao centro onde a porta de saída e uma válvula de retenção está situado. O ciclo de compressão está em andamento por 2,5 voltas, o que praticamente dá constante e fluxo de ar sem pulsação (MANUAL ATLAS COPCO, 2015).

Figura 6 - Compressor Scroll



Fonte: Atlas Copco (2015)

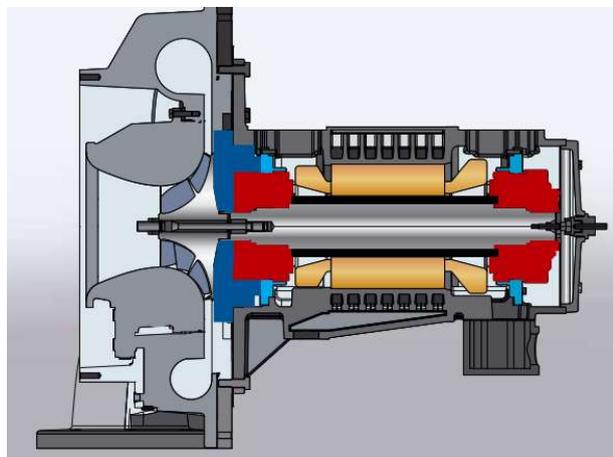
2.4.5 Compressor de palhetas

O princípio de funcionamento de um compressor de palhetas é o de um rotor com rasgos onde são encaixadas as palhetas sem serem fixadas. Quando o rotor gira as palhetas são jogadas contra a carcaça da unidade por força centrífuga. Dessa forma aprisionando o ar e aumentando a pressão com a redução do volume. O volume entre as palhetas é reduzido porque o rotor é instalado em posição excêntrica à carcaça. Este tipo de compressor recebe lubrificação junto ao ar que está sendo comprimido. As palhetas são fabricadas de ligas fundidas especiais, material plástico ou fibra de vidro. O ar é admitido pela unidade compressora por diferença de pressão através da janela de admissão. Com a rotação o volume onde está aprisionado diminui de volume e aumenta a pressão. A descarga do ar pressurizado também é feita por uma janela na carcaça da unidade compressora. (MANUAL ATLAS COPCO, 2015).

2.4.6 Compressor radial

O compressor radial (Figura 7) comumente conhecido como centrífugo, é utilizado em aplicações que demandam grandes vazões com baixa amplitude de variação. Um compressor centrífugo é caracterizado pelo seu fluxo de descarga radial. O ar é puxado para o centro de um impulsor rotativo com lâminas radiais e é empurrado para fora em direção ao perímetro do impulsor por forças centrífugas. O movimento radial do o ar resulta simultaneamente em um aumento de pressão e uma geração de energia cinética. Antes que o ar seja conduzido para o centro do impulsor do próximo estágio do compressor, ele passa por um difusor e uma voluta onde a energia cinética é convertida em pressão (MANUAL, ATLAS COPCO, 2015).

Figura 7 - Compressor Radial



Fonte: Manual Atlas Copco (2015)

A relação de compressão entre os estágios é determinada pelo desenho da hélice impelidora. O processo é parecido com o de bombas centrífugas que jogam o fluxo contra a carcaça, no caso do compressor este fluxo de ar é dirigido para um difusor onde ele perde velocidade e ganha pressão. Como o ganho de pressão é pequeno normalmente o compressor centrífugo tem vários estágios e entre os estágios o ar é resfriado. Os estágios de compressão são acionados por uma grande engrenagem central chamado “bullgear”. O resfriamento entre os estágios é realizado através de camisas d'água nas paredes internas do compressor. Para compressores mais modernos é utilizado resfriadores intermediários. Como os compressores são para grandes vazões, os impelidores giram a altas velocidades que conforme o projeto e o estágio de compressão podem gerar até a 30.000 rpm (MANUAL ATLAS COPCO, 2015).

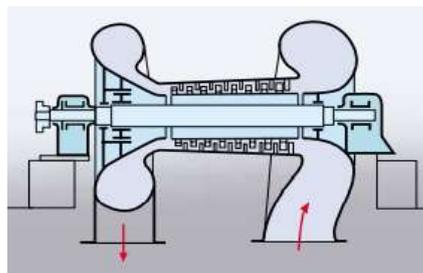
Comparando sua eficiência por estágio com a de um compressor de deslocamento positivo, esta seria menor. Por este motivo são empregados vários estágios. (NOÇÕES DE COMPRESSORES, 2006).

2.4.7 Compressor axial

Um compressor axial (Figura 8) tem fluxo axial, do qual o gás passa ao longo do eixo do compressor através fileiras de lâminas rotativas e estacionárias. Desta maneira, a velocidade do ar é gradualmente aumentada não mesmo tempo que as lâminas estacionárias convertem a energia cinética para pressão. Um tambor de equilíbrio é geralmente embutido no compressor para contrabalançar o impulso axial (MANUAL ATLAS COPCO, 2015).

Os compressores axiais são geralmente menores e mais leves do que seus compressores centrífugos equivalentes e normalmente operam em velocidades mais altas. Eles são usados para taxas de fluxo de volume constante e alto em uma pressão relativamente moderada, por exemplo, em sistemas de ventilação. Dada sua alta velocidade de rotação, eles são acoplados de maneira ideal a turbinas a gás para geração de eletricidade e propulsão de aeronaves (MANUAL ATLAS COPCO, 2015).

Figura 8 - Compressor Axial



Fonte: Atlas Copco (2015)

2.4.8 Especificação dos compressores

Um compressor é um equipamento que deve ser capaz de atender a demanda de energia pneumática, ou seja, suprir as demandas de pressão e vazão, está em conformidade com a qualidade do ar comprimido exigido nos pontos de consumo capazes trabalhar nas condições do local de instalação. Então a especificação completa do compressor requer dados para seu dimensionamento, adequação ao nível de impureza permitido no sistema condições de trabalho para que o mesmo opere de forma econômica e esteja também preparado para futuras expansões. Para especificar corretamente o compressor são necessários dos seguintes dados:

- Demanda de ar (vazão);
- Vazão fixa ou variável;
- Pressão de operação;
- Altitude da instalação;
- Temperatura do local de instalação;
- Umidade relativa do local de instalação;
- Tipo do compressor;
- Sistema de tratamento do ar;
- Reservatório de ar;
- Tensão elétrica;
- Proteção do motor.

2.4.9 Dimensionamento do Compressor

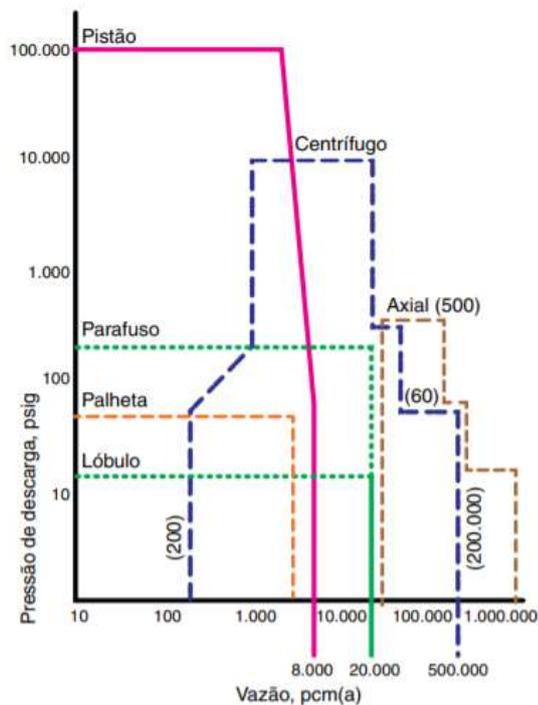
O ponto inicial para realizar o dimensionamento do compressor é entender qual a pressão e vazão dos pontos consumidores e como é seu regime de operação. O levantamento desses dados pode ser feito de forma teórica, ou utilizando equipamentos de medição que façam a leitura de todo o perfil de consumo. Se o levantamento de dados for realizado de forma conceitual na qual acontece na maioria das vezes, em casos de projeto de uma nova instalação, segundo (MANUAL ATLAS COPCO, 2015) requer uma lista de máquinas e seus respectivos dados de consumo de ar e fatores de utilização. Se os dados não estiverem disponíveis pode ser estimado comparados ao consumo medido em aplicações semelhantes.

A vazão total do sistema for definida deve ser estabelecido um fator entre 20% e 50% para futuras ampliações (PARKER, 2006).

Se o levantamento de dados for realizado com equipamentos que medem o perfil de consumo de ar comprimido da fábrica, está é considerada a forma ideal por ser de fato o consumo real e não adicionar fator escolhidos de forma subjetiva. Será mostrado no desenvolvimento como será realizada este tipo de medição.

Após o conhecimento da pressão e vazão total poder ser escolhido, de formar preliminar, qual o tipo do compressor que mais se adequa na operação desejada. O diagrama de seleção de compressores (Figura 9) auxilia na escolha do tipo de compressor mais indicado para atender a vazão e pressão de trabalho (PARKER, 2007):

Figura 9 - Seleção de Compressores



Fonte: Parker (2007)

2.4.10 Condições do local de instalação do compressor

Para escolher o compressor deve ser conhecido as condições ambientais como: altitude acima do nível do mar, temperatura ambiente e umidade relativa, se o local é aberto ou não, qual o tipo de contaminante. Todas estas condições ambientais devem ser consideradas pois as mesmas influências na eficiência e vida útil do compressor.

Quanto mais baixa for a temperatura de aspiração de um compressor, menor será a energia necessária para sua compressão. Quanto mais baixa for a temperatura do ar aspirado, maior será a quantidade de massa de ar que poderá ser aspirada pelo compressor com a mesma vazão volumétrica aspirada e mesma potência consumida neste trabalho, isto porque o ar mais frio é mais denso (PROCELL, 2009).

Tanto a pressão quanto a temperatura ambiente diminuir com a altitude acima do nível do mar. Quanto mais baixo a pressão de entrada impacta a razão de pressão, para os compressores, bem como para o equipamento conectado, o que, na prática, significa um impacto sobre consumo de energia e consumo de ar. Ao mesmo tempo, as mudanças devido à maior altitude também afetarão a potência nominal disponível de motores elétricos e de motores de combustão (MANUAL AR COMPRIMIDO ATLAS COPCO, 2015).

A umidade relativa ambiente do local de instalação do compressor tem uma relação inversamente proporcional com entrega do ar.

2.4.11 Qualidade do ar de entrega do compressor

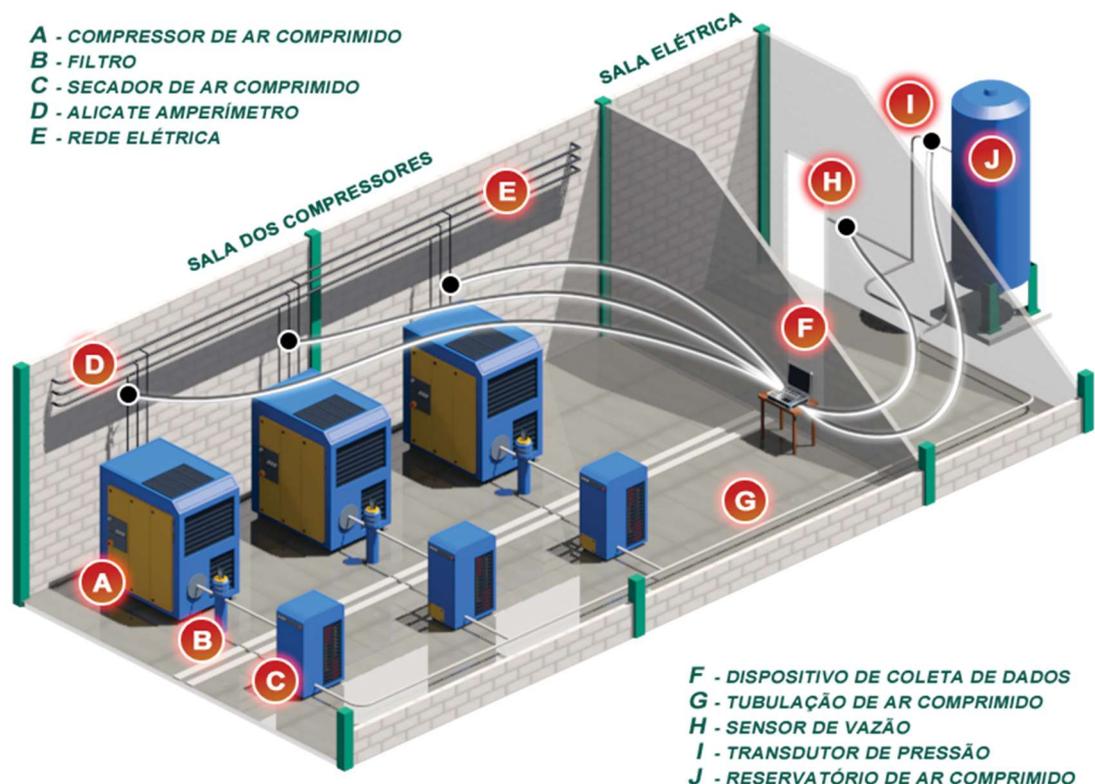
A qualidade do ar comprimido exigida nos pontos consumidores pode variar de acordo com a aplicação, como por exemplo, uma indústria alimentícia em que o ar comprimido possa entrar em contato com o alimento produzido, requer grau de pureza muito maior do que uma indústria cimenteira numa simples aplicação de acionamento de atuadores pneumáticos. Quando falamos do grau de pureza refere-se à quantidade de particulados, água, óleo que podem ser encontrados no ar comprimido. A norma ISO 8573-1 defini todo o sistema de tratamento do ar para que possa atingir o nível de pureza adequado de acordo com a aplicação, esse sistema de tratamento pode ser equipamentos que reduzem a impureza do ar ou podem estar integrados ao compressor, isso impacta diretamente na sua especificação, definindo se o mesmo deve ser isento de óleo ou com filtros coalescentes integrados.

2.5 Medição do perfil de consumo

Está é uma etapa fundamental para avaliar o desempenho da geração do ar comprimido. A medição consiste em coletar dados da vazão, pressão e energia elétrica do ar comprimido. Essa análise deve durar pelo menos uma semana de operações, e o período de medição deve ser selecionado com cuidado para permitir que represente um caso típico e forneça dados relevantes.

Os dados armazenados também fornecem uma oportunidade para simular medições diferentes e mudanças nas operações do compressor, e analisar o impacto na economia geral da instalação (MANUAL ATLAS COPCO, 2015). Para realização da medição é instalado um sensor de vazão e um transdutor de pressão na tubulação principal de alimentação da fábrica, onde esses dados são armazenados para serem geradas as curvas de vazão e pressão que o sistema opera. Também é instalado alicates amperímetros na fase principal de alimentação de cada compressor para saber o consumo de energia elétrica consumida. O esquema de ligação do sistema de medição é apresentado a seguir (Figura 10). O conjunto dessas três curvas (vazão, pressão e energia elétrica) possibilita encontrar parâmetros de eficiência energética, como por exemplo, consumo específico do ar comprimido, saber qual o tempo de operação de cada compressor, identificar os momentos de carga e alívio, saber se o sistema possui déficit, encontrar a vazão real do sistema e poder analisar qual o tipo de compressores que atendam a demanda de forma mais eficiente. Também é importante verificar se há vazamentos. Para a produção de pequenas quantidades de ar durante a noite e nos finais de semana, deve-se considerar se vale a pena instalar um compressor menor para cobrir essa demanda (ATLAS COPCO, 2021, ONLINE).

Figura 10 - Esquemático Sistema de Medição



2.6 Parâmetros de benchmarking para eficiência energética do ar comprimido

Benchmarking é a prática de determinar parâmetros chaves de operação de um sistema para fornecer pontos de comparação, constituindo-se em uma valiosa ferramenta de rastreamento do desempenho do sistema, de identificação de problemas e de determinação da eficácia de alterações implementadas no sistema. Alguns índices de referência práticos são: consumo específico do compressor, custo unitário do ar comprimido e necessidade de ar comprimido do produto final (PROCELL, 2009).

O presente trabalho utiliza a potência específica como parâmetro de eficiência energética, pois retrata o consumo energia elétrica para cada metro cúbico de ar produzido. Os valores ideais a serem assumidos para o consumo específico de centrais de ar comprimido com compressores de parafusos é abaixo 0,1 kWh/m³ praticados por engenheiros especialistas da área. Para compressores de parafusos de duplo estágio foi adotado neste trabalho assumir o valor de benchmarking para potência específica de **0,095 kWh/m³**, levando em consideração a quantidade e porte dos compressores a serem utilizados. Vale ressaltar que a potência específica não é um valor fixo, podendo varia com o tipo e tamanho do compressor e sua utilização, sendo particular para cada situação.

Os índices de referência podem ser usados para comparar uma instalação com um sistema teórico para determinar o desempenho máximo atingível (eficiência clássica). Os índices de referência também são usados para comparar a operação atual com o histórico das operações passadas. Isto pode identificar as falhas potenciais dentro do sistema, bem como identificar oportunidades de melhorias da eficiência. Outro uso comum dos índices de referência é na comparação de instalações similares (PROCELL, 2009).

2.6.1 Custo do ar comprimido

Abaixo se encontra a fórmula do custo de energia da operação de um motor elétrico, no qual é a maior fonte de consumo (PROCELL, 2009):

$$C = \frac{HP * FS * 0,735 * n^{\circ}horas * e * \%tempo * (\%pcv - plena\ carga)}{n}$$

C – Custo de energia[R\$]

HP – Potência do motor [hp].

FS = Fator de serviço do motor.

0,735 = conversão entre cv e kW.

n° horas = Número de horas de funcionamento [h]

e = Valor pago kWh [R\$/kWh]

%tempo = percentual do tempo trabalhando neste nível de operação.

%pcv-plena carga = Percentual do tempo a plena carga neste nível de operação.

n = Rendimento do motor.

2.6.2 Custo anual do compressor trabalhando em carga

A seguir é apresentado a fórmula do custo anual de geração trabalhando em carga (PROCELL, 2009).

$$C_{ac} = \left[\sum_{i=1}^c (P_{cci} * t_{cci}) \right] * C_{kW}$$

C_{ac} = custo anual de geração, compressor em carga [R\$/ano]

P_{cc} = potência do compressor em carga [kW]

t_{cc} = tempo de funcionamento em carga [h/ano]

C_{kW} = custo específico de energia elétrica [kW]

c = número de compressores do sistema

2.6.3 Custo Anual do Compressor Trabalhando em Vazio

A seguir é apresentado a fórmula do custo anual de geração trabalhando em vazio (PROCELL, 2009).

$$C_{av} = \left[\sum_{i=1}^c (P_{cvi} * t_{cvi}) \right] * C_{kW}$$

C_{av} = custo anual de geração, compressor em vazio [R\$/ano]

P_{cc} = potência do compressor em vazio [kW]

t_{cc} = tempo de funcionamento em vazio [h/ano]

C_{kW} = custo específico de energia elétrica [kW]

c = número de compressores do sistema

2.6.4 Custo Anual de Geração de Ar Comprimido

A seguir é apresentado a fórmula do custo anual de geração trabalhando em carga e alívio (PROCELL, 2009).

$$C_{aa} = C_{ac} + C_{av}$$

C_{aa} = custo anual de geração do ar comprimido [R\$/ano]

C_{ac} = custo anual de geração, compressor em carga [R\$/ano]

C_{av} = custo anual de geração, compressor em vazio [R\$/ano]

2.6.5 Custo específico do ar comprimido

A partir do custo anual de geração de ar comprimido podemos calcular a o custo específico através da formula (PROCELL,2009):

$$C_{ar} = \frac{C_{aa}}{60 * \sum_i^c (V_{cci} * t_{cc})}$$

C_{ar} = custo específico do ar comprimido [R\$/m³]

C_{aa} = custo anual de geração do ar comprimido [R\$/ano]

V_{cci} = vazão do compressor [m³/min]

t_{cc} = tempo de funcionamento do compressor em carga [h/ano]

c = número de compressores do sistema

2.7 Avaliação financeira do retorno do investimento

Nesta etapa será apresentado os dois indicadores para avaliar o retorno sobre o investimento, que pode ser aplicado no projeto de eficiência energética.

2.7.1 Retorno sobre o investimento (ROI)

O ROI é um indicador utilizado para avaliar em quantas vezes foi o ganho ou perda sobre o investimento inicial, num determinado tempo, pode ser expresso pela formula abaixo:

$$ROI = \frac{GO - IT}{IT}$$

IT = Investimento Total [R\$]

GO = Ganho Obtido [R\$]

2.7.2 Prazo de retorno do investimento (payback)

A formula abaixo calcula o tempo para que o rendimento acumulado se iguala ao investimento inicial. Isso é um indicador bastante utilizado pela equipe de engenheiros no estudo de viabilidade do projeto.

$$PRI = \frac{IT}{L}$$

PRI = Prazo de Retorno do Investimento [anos]

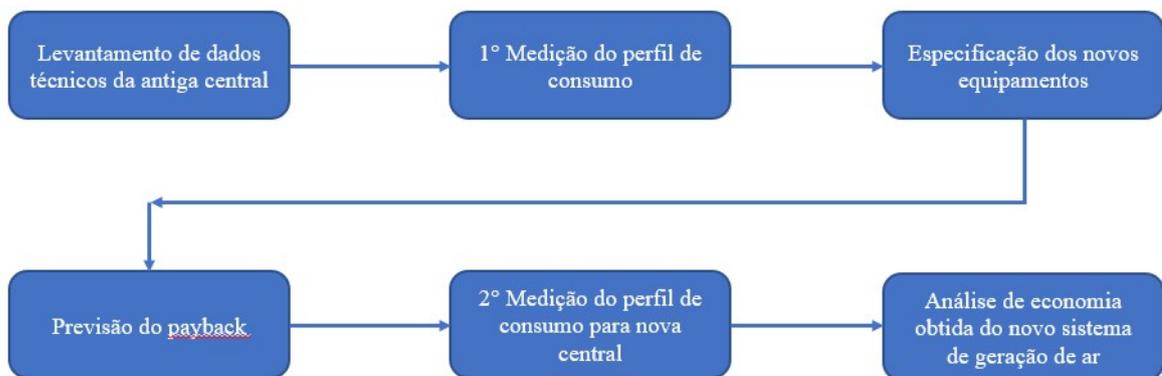
IT = Custo investimento total [R\$]

L = Lucro líquido [R\$/anos]

3 METODOLOGIA

O trabalho consiste em apresentar um estudo de caso realizado numa indústria siderúrgica de Minas Gerais com o objetivo de analisar e substituir sua geração de ar comprimido, escolhendo tecnicamente os equipamentos que alcancem números de benchmarking em termos de eficiência energética. O trabalho foi realizado resumidamente em seis etapas conforme fluxograma apresentado na figura 11. Na primeira etapa devia-se saber os dados técnicos dos equipamentos da casa de compressores e dimensionar quantos instrumentos seriam utilizados na medição, definindo a instalação dos instrumentos em locais estratégicos. Em seguida teve a fase mais importante do trabalho, a primeira medição do perfil de consumo, que serviu de base para especificar a nova central de ar comprimido. Após a especificação dos novos equipamentos foi realizado uma análise do *payback* para aprovação do investimento com a engenharia e diretoria da fábrica. Com o investimento aprovado e os novos equipamentos operando foi feita uma nova medição do perfil de consumo para validar a performance e economia de energia obtida com os novos compressores.

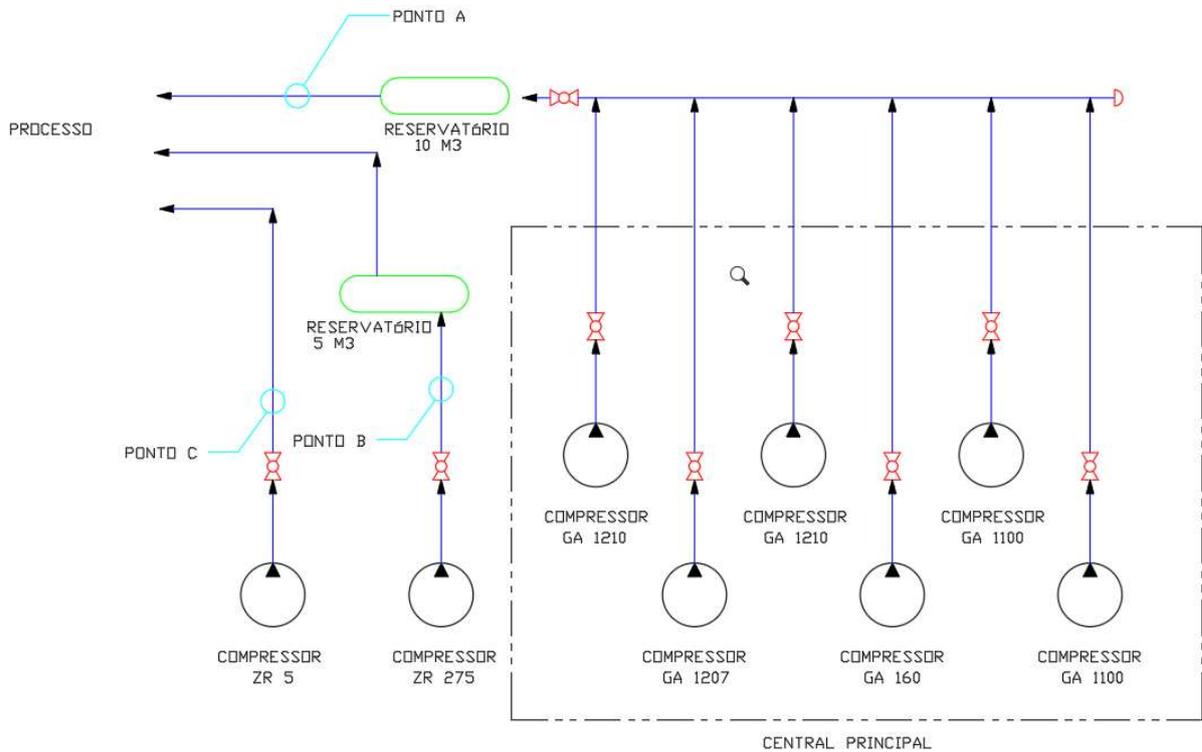
Figura 11 - Etapas do trabalho



Fonte: autor

O ar comprimido é de extrema importância no processo da indústria em estudo, que fabrica produtos cerâmicos com base de carbeto de silício (SiC) tendo sua utilização com alta demanda na etapa de acabamento das peças. O fluxograma da central de ar comprimido deste estudo (Figura 12) está sendo representado o sistema de geração de ar em análise, no qual é composto fisicamente por uma central principal com seis compressores e mais dois compressores auxiliares (ZR 5 e ZR 275) sendo todos utilizando a mesma tecnologia de unidade de compressão por parafuso simples estágio.

Figura 12–Fluxograma Central de Ar (1º Avaliação)



Fonte: autor

Para atender a demanda de ar comprimido da fábrica é realizado o revezamento dos compressores da central principal e compressores auxiliares. O ar gerado pelos compressores da central principal e o compressor ZR 275 são, respectivamente, armazenados em reservatórios de 10 m³ e 5 m³. Em seguida todo o ar gerado é conectado ao manifold principal de distribuição da fábrica que alimenta os setores dos moinhos, automação e filtros mangas. Sendo o setor dos moinhos consome cerca de 70% do ar comprimido produzido, e utiliza ar comprimido no processo de acabamento das peças produzidas.

4 DESENVOLVIMENTO

Neste tópico serão apresentados o desenvolvimento do trabalho antes e depois da implementação da nova central de compressores.

4.1 Antes da melhoria

4.1.1 Primeira medição

Antes de iniciar a primeira medição foi necessário realizar um levantamento em campo para obter as informações técnicas a partir dos dados de plaquetas e definir o regime de operação dos equipamentos com a equipe de utilidades da fábrica. No levantamento em campo foram obtidos a quantidade de compressores e suas respectivas vazões nominais, pressão de trabalho, potência do motor, especificações das cablagem e fator de serviço. Em campo foi definido o local de instalação e o tipo do medidor de vazão, de acordo com o seu diâmetro e vazão a ser medida.

O tempo de coleta dos dados ocorreu simultaneamente para todos os compressores no período de sete dias, fechando um ciclo de uma semana, conforme indicado no Manual do Ar Comprimido Atlas Copco, sendo satisfatório para ser projetado o consumo de ar comprimido para os próximos anos. A capacidade de leitura dos equipamentos utilizados é de uma medição a cada segundo, logo esses dados foram registrados no software, armazenado numa planilha e foram gerados os gráficos de vazão, pressão e potência elétrica consumido pelo sistema.

Para realizar a medição na central principal foi instalado medidor de vazão e transdutor de pressão na tubulação logo após o reservatório indicado no ponto A apresentado no fluxograma (figura 12) o que permitia coletar toda vazão e pressão gerada pelos compressores. Para os compressores ZR 275 e ZR 5 foram instalados nos pontos B e C, respectivamente. Foram instalados os alicates amperímetro no condutor fase que alimenta cada compressor para medir a corrente e assim obter a potência de operação.

O comportamento do sistema de geração de ar comprimido é entendido através dos gráficos dos anexos A, B e C que representam os dados de vazão, pressão, demanda, déficit e potência registrados nos sete dias de leitura obtidos na primeira medição. A demanda corresponde a vazão de ar necessária para se atingir a pressão da rede. O déficit é calculado automaticamente pelo sistema de medição, representando a vazão de ar para que não haja diferença de pressão entre a geração e a rede.

Normalmente a curva de vazão fica aproximadamente 10% abaixo da curva de demanda e 90% acima da curva de déficit, exceto nos pontos de picos de consumo. Sempre que o sistema de controle de pressão dos compressores enxerga o déficit faz com que seja mantido os mesmos em operação para produzir ar comprimido e atender a demanda dos pontos consumidores. A curva de vazão é de fato o quanto de ar está sendo produzido pelos compressores, porém em alguns momentos pode se ter picos de vazão podendo ultrapassar até a capacidade nominal dos compressores. Esses picos acontecem geralmente em pontos de partida e desligamento do sistema de ar comprimido onde se tem uma velocidade de escoamento muito alta, aumentando exponencialmente a vazão. Esses momentos devem ser desconsiderados pois alteram bruscamente a leitura dos equipamentos de vazão, com isso o software utilizado no trabalho contabiliza esses momentos e corrige a vazão.

Na tabela 2 são apresentados os dados técnicos de todos os compressores e na tabela 3 seus respectivos regimes de operação.

Tabela 2 - Dados da Central Principal

Modelo	TAG	Pressão nominal [Bar]	Vazão nominal [m ³ /h]	Potência nominal [kW]	Corrente nominal [Amper]	Fator de potência do motor	Fator de serviço do motor
GA 1210	CP 01	8,6	1260	187,5	340	0,88	1,0
GA 1207	CP 02	8,6	1260	150	275	0,88	1,1
GA 1210	CP 03	8,6	1260	187,5	340	0,88	1,1
GA 160	CP 04	8,6	1662	150	327	0,88	1,2
GA 1100	CP 05	8,6	1098	150	275	0,88	1,0
GA 1100	CP 06	8,6	1098	150	275	0,88	1,0
ZR 275	ZR 275	8,6	2700	262,5	450	0,88	1,0
ZR 5	ZR 5	8,6	3564	375	100	0,88	1,0

Fonte: autor

Tabela 3 - Considerações sobre o regime de operação da central de ar principal

Informações	Unidade	Central principal	ZR 275	ZR 5
Regime de operação	Horas	24h/dia (8.000h/ano)	24h/dia (8.000h/ano)	24h/dia (8.000h/ano)
Potência total	[kW]	975,00	262,5	375
Capacidade total	[m ³ /h]	7638	2700	3564
Potência específica nominal	[kWh ³]	0,1276	0,0972	0,1052
Fator específico aceitável	-	1,20	1,20	1,20
Pressão mínima exigida	[bar]	6,50	6,50	6,50
Pressão de trabalho da central	[bar]	7,00	7,00	7,00
Temperatura da tubulação	[C°]	33	33	33
Temperatura média do local	[C°]	33	33	33
Tratamento do ar comprimido	-	Não	Não	Não
Reservatórios	-	Sim	Sim	Não
Quantidade	Und.	1	1	0
Volume	[m ³]	10	5	0
Pressão de trabalho	[bar]	7	7	7
Altitude do local da central	[m]	1060	1060	1060
Pressão atmosférica do local	[atm]	0,96	0,96	0,96
Umidade relativa média	[%]	60	60	60

Fonte: autor

4.1.2 Análise da primeira medição

Além dos gráficos encontrados nos anexos citados anteriormente, o software utilizado no estudo também desenvolve um resumo do custo energético com base nos dados coletados pelos equipamentos de medição, conforme será apresentado a seguir, sobre a situação atual da geração de ar comprimido. O resumo apresenta os números da eficiência e o custo de energia elétrica para operar o sistema, estas informações servem de base para fazer projeções ao longo tempo sobre o custo de operação e comparar o cenário atual com o cenário após a implementação dos novos compressores.

A seguir é apresentado na tabela 4, o resumo das potências específicas obtido pelo processamento dos dados.

Tabela 4 - Potência Específicas da Sistema Atual

Compressor	Potência Específicas			
	Potência Instalada	Capacidade Instalada	Potência Específica Nominal	Potência Específica Média Lida
Central Principal	975 kW	7.638 m ³ /h	0,1276 kWh/m ³	0,1411 kWh/m ³
ZR 5	375 kW	3.564 m ³ /h	0,1052 kWh/m ³	0,1411 kWh/m ³
ZR 275	262,5 kW	2.700 m ³ /h	0,0972 kWh/m ³	0,1407 kWh/m ³
Total	1.612,5 kW	13.902 m ³ /h	0,1159 kWh/m ³	0,1409 kWh/m ³

Fonte: autor

A partir do quadro de potência específicas é possível mensurar o quanto o sistema está sendo eficiente, ou seja, o quanto de energia é consumida para produzir cada metro cúbico de ar comprimido. No cenário atual o consumo específico real é de 0,1409 kWh/m³, ficando 21,57% acima do consumo específico nominal dos compressores, demonstrando que o sistema de ar está consumido muito mais energia do que o esperado.

Na tabela 5 encontra-se resumidamente as vazões lida durante a auditoria. Esta é a real produção de ar comprimido da fábrica em estudo que será utilizada na especificação dos novos compressores.

Tabela 5 - Vazões do Sistema Antes da Melhoria

Vazões do Sistema		
Central	Vazão Média Corrigida	Vazão Máxima
Central Principal	3.030 m ³ /h	5.702 m ³ /h
ZR 5	2.040 m ³ /h	3.389 m ³ /h
ZR 275	1.488 m ³ /h	2.553 m ³ /h
Total	6.558 m ³ /h	11.644 m ³ /h

Fonte: autor

Na tabela 6 é apresentado o consumo de energia elétrica do sistema de ar comprimido antes da melhoria.

Tabela 6 - Consumo Energético do Sistema Antes da Melhoria

Consumo Energético		
Equipamentos	Potência lida [kW]	Energia anual [kWh]
Central Principal	427,533	3.420.264
ZR 5	287,844	2.302.752
ZR 275	209,362	1.674.896
Total	924,739	7.397.912

Fonte: autor

A partir do consumo energético acima e o preço pago pelo quilowatt-hora informado pelos responsáveis da indústria é obtido o custo de energia elétrica anual dos compressores:

Tabela 7 - Custo de Energia Antes da Melhoria

Custo Energético com Ar Comprimido		
Custo do kWh	Custo por Hora	Custo Anual
R\$ 0,23	R\$ 212,52	R\$ 1.700.200,85

Fonte: autor

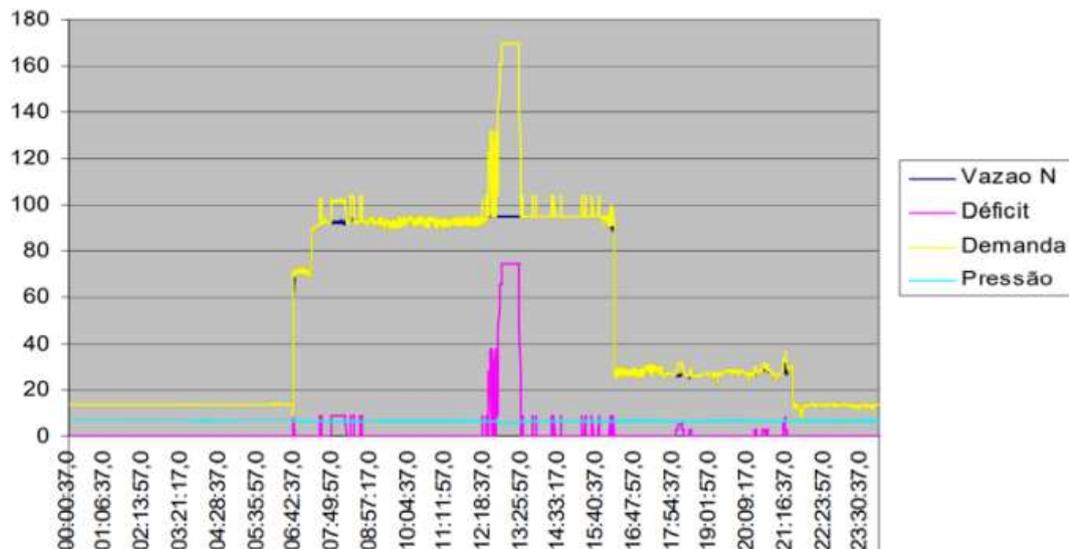
É visto na tabela 7 que o custo com energia elétrica para operar o sistema de ar comprimido é bastante expressivo, tornando o maior consumidor de energia elétrica na indústria em estudo de caso.

4.1.3 Análise dos gráficos

Ao analisar os gráficos de leitura, pode se observar que alguns compressores ficaram ligados por longos períodos sem que houvesse demanda de ar comprimido. Este é um dos fatos que contribuíram para elevar a potência específica. Nos gráficos do segundo e terceiro dia do (anexo A) das figuras 16 a 19 pode se observar baixa demanda e potência consumida, isso acontece com o compressor ZR 275 observado nas figuras de 30 a 33, e mais recorrente nos gráficos do compressor ZR 5.

Pelo período estudado os compressores são capazes de atender a demanda de ar comprimido. Sendo assim, na maioria das vezes, a curva de demanda quase coincide com a curva de vazão e gerou curva de déficit em momentos de pico. Nos momentos onde apresenta déficit a curva de demanda se distancia da curva de vazão, e tendo compressores desligados sem motivos aparentes. Como o déficit é gerado por baixa pressão na rede o sistema calcula quanto de ar é necessário para manter a pressão em 6,5 bar e lança este dado como déficit. Pode ser observado que o déficit é gerado quando se tem picos de demanda e logo os compressores consegue corrigir e estabilizar a pressão. A pressão do sistema é estabilizada entre 6,5 a 6,8 bar. Todas essas observações podem ser compreendidas sendo exemplificado na figura 13.

Figura 13 - Medição da vazão do perfil de consumo.



Fonte: autor

4.1.4 Análise de outros fatores

Além de ser analisado os gráficos e os custos foi observado outros fatores que também interferem nos resultados da medição ou contribuem para que haja uma redução na eficiência do sistema de geração.

- A temperatura ambiente, que varia entre 26°C a 33°C, das centrais é compatível com a recomendação dos fabricantes dos compressores, não sendo motivo de interferir nas operações dos mesmos. Porém a temperatura lida na tubulação de descarga dos compressores é alta podendo chegar até 41 °C, isso contribui para formação de condensado na linha.

- Foi observado que o ar comprimido está com grande presença de condensado. A temperatura registrada na tubulação logo após os compressores, a formação de condensado persiste ao longo da rede até os pontos de consumo. Aumentando a perda de carga e conseqüentemente a consumo de energia, além de danificar os equipamentos que utilizam o ar comprimido.
- Pelo número de compressores em operação, torna a disponibilidade dos equipamentos é alta demonstrando que a manutenção é compatível.

4.1.5 Considerações sobre os vazamentos

É imprescindível considerar os vazamentos presentes na rede de tubulação e nos pontos de consumo pois os mesmos podem representar uma grande parcela no consumo de ar, conhecidos como “consumo virtual”, que não tem relevância na utilização, mas acabam gerando demanda. Antes de iniciar o trabalho foi verificada com os responsáveis da planta que recentemente tem sido feitos serviços e auditorias para sanar os vazamentos, sendo assim podendo estimar que a perda de ar comprimido é baixa, ficando menos de 5% da vazão produzida, um percentual relativamente baixo encontrados no segmento industrial

4.2 Elaboração da nova central de ar comprimido

Após a verificação dos resultados da medição é percebido que o custo para operar o sistema de geração de ar comprimido na indústria é muito alto, na ordem de grandeza de 1,7 milhões anuais, sendo assim poucas reduções do seu consumo trará resultados financeiros bastantes expressivos. É importante que a solução de eficiência energética atinja valores de benchmarking praticados no segmento industrial, trazendo retorno sobre o investimento.

Visto que a potência específica média lida no sistema de geração ($0,1409 \text{ kWh/m}^3$) é considerado bastante alto em comparação ao valor praticado por engenheiros especialistas de $0,1 \text{ kWh/m}^3$ para centrais com compressores de parafusos rotativos. O ideal que sejam introduzidos compressores modernos e mais eficientes para que a potência específica lida seja reduzida. Como objetivo deste estudo assumisse o valor de $0,095 \text{ kWh/m}^3$. A solução apresenta um cenário de uma nova central de ar comprimido mais eficiente capaz de atender a demanda de ar, e que não tenha problemas de qualidade. Foi escolhido a substituição de compressores de simples estágio para compressores de duplo estágio, que são os tipos de compressores parafuso lubrificado mais eficientes encontrados no mercado.

4.2.1 Novo arranjo da central de compressores

De acordo com a leitura realizada na medição, a vazão máxima consumida de ar comprimido é de 11.644 m³/h, apenas em picos de demanda. Foi considerado utilizar cinco compressores para atender a demanda de ar, sendo três de velocidade fixa mais um compressor variável para atender a demandas parciais e mais compressor em standby de velocidade fixa.

A quantidade de compressores foi reduzida oito para cinco, isso se torna um ponto muito positivo devido à redução de quantidade máquinas inoperantes, peças sobressalentes, manutenção e mão de obra diversificada.

Na tabela 8 é visto que a vazão total nominal dos compressores é de 12.540 m³/h, confirmando que a nova proposta vai atender a demanda atual. Se o arranjo dos quatro compressores estiver em total funcionamento a capacidade da central é de 10.032 m³/h sendo a vazão média lida no sistema atual de 6.558 m³/h, em outras palavras, 53% a mais do que a média consumida pela fábrica, podendo suportar futuras ampliações. A pressão nominal dos novos compressores, 8,6 bar, consegue superar a pressão que opera o sistema antigo entre 6,5 e 6,8 bar e também atender os momentos de picos. Segundo a ficha técnica dos novos compressores Ingersoll Rand (2013, ONLINE) reflete os seguintes dados:

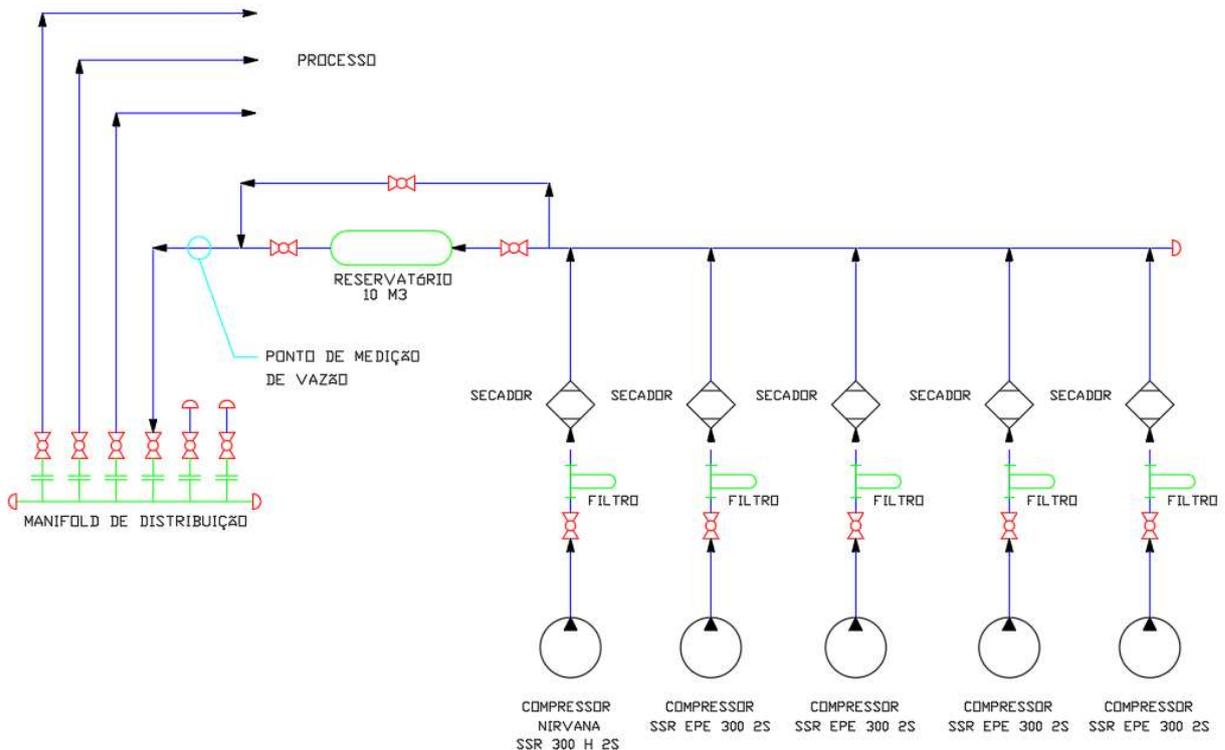
Tabela 8 - Dados Técnicos do Novo Sistema

Equipamento	Quantidade	Pressão Nominal	Vazão Nominal	Potência Nominal	Potência Específica Nominal
		[bar]	[m³/h]	[kW]	[kWh/m³]
SSR EPE 300 -2S	04	8,6	2.508	225	0,0897
Nirvana SSR 300 H 2S	01	8,6	2.508	225	0,0897
Total	05	8,6	12540	1125	0,0897

Fonte: autor

Além dos compressores a nova central de ar comprimido contempla um sistema de tratamento para realizar a filtragem e secagem do ar comprimido, contando com um secador de refrigeração e filtro dedicado para cada compressor. O secador elimina a água presente no ar e o filtro coalescente remove os particulados de até 0,1 µm. Depois que o ar comprimido ser gerado e tratado em seguida é armazenado no reservatório de 10 m³ e assim disponível para uso conforme o fluxograma apresentado na figura 13.

Figura 14 - Fluxograma da nova central de compressores.



4.2.2 Previsão do retorno do investimento

A partir da vazão média registrada que o sistema consome em média $6.558 \text{ m}^3/\text{h}$ de ar comprimido, sabendo que a potência específica nominal da nova central seja de $0,0897 \text{ kWh/m}^3$, fazendo o produto de ambos é encontrado a potência teórica de $597,22 \text{ kW}$. Como o custo do quilowatt pago pela planta é de R\$ 0,23 centavos, considerando que o regime de operação seja 8.000 horas anuais, conclui-se que o custo anual estimado de energia elétrica seja de R\$ 1.082.384,78. Comparado com o custo anual da central antiga de R\$ 1.700.200,85 foi obtida uma estimativa de economia anual de R\$ 617.816,07 com energia elétrica, uma redução de 36,34%. Porém essa redução está baseada em potências nominais dos novos compressores, será apresentado na segunda medição a real diminuição após a implementação.

O departamento de engenharia junto com a diretoria da fábrica em estudo tem a prática de avaliar o *payback* do investimento, sendo para aceitável para esse tipo de projeto até 3,5 anos. Foram realizados orçamentos para o levantamento de custos de aquisição dos equipamentos, instalação (civil, mecânico, elétrica e automação) comissionamento e projeto executivo no valor total de R\$ 1.737.400,00. Portanto o tempo de retorno sobre o investimento é de aproximadamente 2,81 anos, sendo considerado bastante atrativo pela fábrica e com isso aprovado a implementação do projeto.

4.5 Análise do Sistema depois da melhoria

4.5.1 Medição da nova central de compressores

Foi solicitado pela equipe de engenharia da fábrica que fosse realizado a mesma análise de medição do perfil de consumo para comprovar a economia energética após a implementação da nova central de ar comprimido. O estudo foi repetido com a mesma configuração do sistema de medição, sendo medido a corrente elétrica dos novos compressores e medindo a vazão e pressão após o reservatório de 10 m³, no período de oito dias. Os gráficos obtidos da nova medição podem ser encontrados no Anexo D.

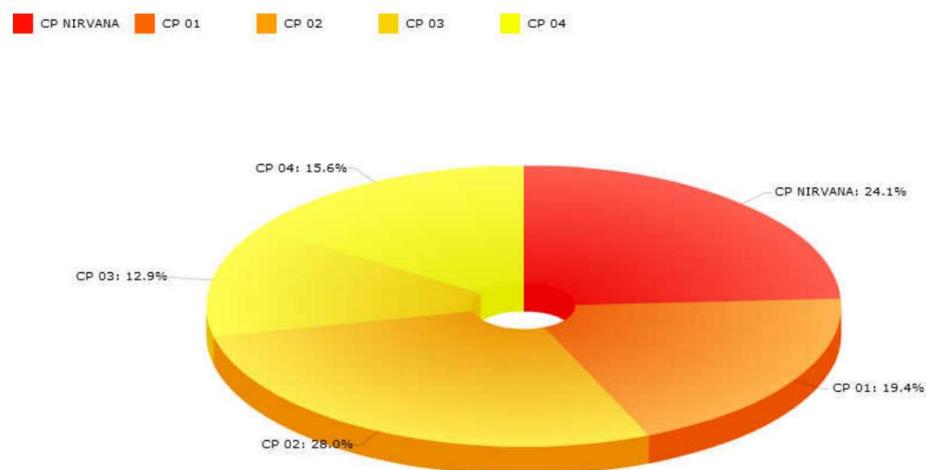
A única diferença expressiva é a atualização do software utilizado para processar os dados coletados, essa diferença será bastante perceptível nos gráficos apresentados deste trabalho.

Durante a leitura de dados somente os compressores novos estavam em operação, que produziam ar conforme a necessidade da planta industrial e entravam e saiam de operação eventualmente conforme necessidade.

4.5.2 Análise dos resultados obtidos da nova central

Foi possível obter através dos dados coletados o quanto cada compressor consegue contribuir para atender a demanda de ar comprimido (Figura 14). Pode ser observado que os outros compressores tiveram uma contribuição parecida, o que é considerado bom para nivelar os desgastes das máquinas.

Figura 15 - Gráfico da Utilização dos Compressores da Nova Central



Fonte: autor

É apresentado na tabela 9 o resumo da potência específica da nova central de ar após a melhoria.

Tabela 9 - Potência Específica da Central de Ar Depois da Melhoria

Potência Específicas Nova Central				
Nova Central de Compressores	Potência Instalada (kWh)	Capacidade Instalada (m³/h)	Potência Específica Nominal (kW/m³)	Potência Específica Média Lida (kWh/m³)
Total	1.125	12.540	0,0897	0,0938

Fonte: autor

Na tabela 10 é demonstrado a vazões coletadas nas medidas.

Tabela 10 - Leitura das Vazão de Ar Depois da Melhoria

Vazões do Sistema Nova Central		
Nova Central de Compressores	Vazão Média Corrigida (m³/h)	Vazão Máxima (m³/h)
Total	4.735,2	12.479,2

Fonte: autor

Com base nos dados da segunda medição pode ser visto na tabela 10, que o consumo de ar foi em média 4.735,2 m³/h, tendo picos máximos de até 12.479,2 m³/h, sendo nestes momentos a pressão se estabilizava próximo de 7,3 bar. Como estes eventos foram muito curtos o sistema manteve a estabilidade na rede sem o menor prejuízo para fornecimento de ar comprimido dentro do requisitado pela planta. É percebido uma redução cerca de 27,8% na vazão consumida em relação a primeira medição (6558 m³/h). Esse fato ocorreu pela baixa produtividade da fábrica no período de medição, devido a implantação de outros equipamentos na linha de produção, posteriormente o consumo da planta foi restabelecido em condições normais de operação. É possível verificar nos gráficos do anexo D que a central de ar comprimido foi desligada, para manutenção da manufatura, no período de 18:00 e 21:00 no primeiro, segundo, quarto e quinto de medição.

Tabela 11 - Consumo de Energia da Central de Ar Depois da Melhoria

Consumo Energético Nova Central		
Nova Central de Compressores	Consumo por hora	Consumo anual (8.000 horas)
Total	444,16 kW	3.553.280 kWh

Fonte: autor

Foi registrado pelo software através o consumo específico da nova central foi de 0,0938 kWh/m³, sendo abaixo do valor estipulado de benchmarking (0,095 kWh/m³) e 4,57 % acima da potência específica nominal. Portanto, o valor de 5% acima é limite técnico pertinente para as características dessa central, de acordo com a prática adotada por engenheiros especialistas de sistema de ar comprimido.

Com base na energia consumida é obtido o custo com energia elétrica para os novos compressores, apresentados na tabela 12, porém não é o custo em condições normais de produção.

Tabela 12 - Custo de Energia Antes da Melhoria

Custo Energético com Ar Comprimido		
Custo do kWh	Custo por Hora	Custo Anual
R\$ 0,23	R\$ 102,16	R\$ 817.257,64

Fonte: autor

4.5.3 Comparação dos resultados

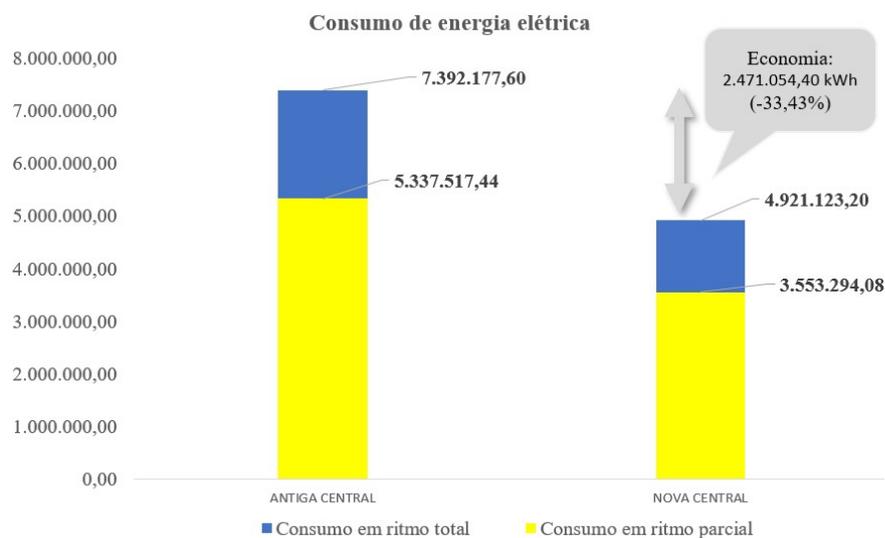
A primeira leitura realizada na central antiga foi constatada uma vazão de 6.558 m³/h, considerando a planta em ritmo normal de produção. Na segunda leitura cerca de um ano da nova central em funcionamento, se teve uma redução temporária na vazão de consumo, assumindo um valor de 4.735,2 m³/h. Como não pode adiar a segunda medição devido ao prazo de fechamento do projeto que a gestão da fábrica exigia, foi realizado a comparação dos resultados considerando as vazões em ritmo parcial e ritmo normal de 6558 m³/h e 4.735,2 m³/h, respectivamente. Sendo a comparação em ritmo normal a mais importante na análise do projeto. No anexo E encontra-se o resumo de informações dos resultados obtidos nas medições.

A seguir é apresentado os valores em comparação da potência específica, consumo de energia, custo anual com energia elétrica e *payback*. da projeção de consumo de energia comparando as centrais de ar comprimido.

4.5.3.1 Comparação no consumo de energia

- Consumo anual de energia da antiga central em ritmo total = 7.392.177,60 kWh
- Consumo anual de energia da nova central em ritmo total = 4.921.123,20 kWh
- Redução de energia = 2.471.054,40 kWh (-33,43%).
- Consumo anual de energia da antiga central em ritmo parcial = 5.337.517,44 kWh.
- Consumo anual de energia da nova central em ritmo parcial = 3.553.294,08 kWh.
- Redução de energia 1.784.223,36 kWh (-33,43%).

Figura 16 - Comparativo consumo de energia

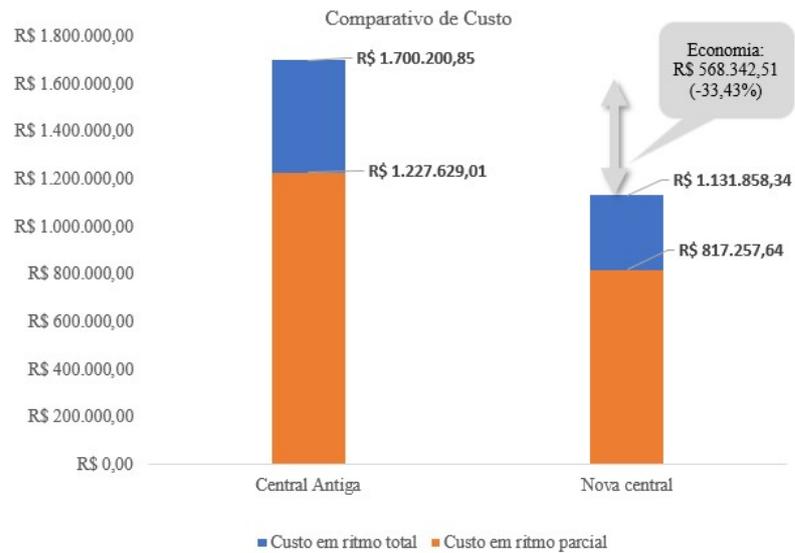


Fonte: autor

4.5.3.2 Comparação do custo de energia elétrica

- Custo anual de energia elétrica da antiga central em ritmo total = R\$ 1.700.200,85.
- Custo anual de energia elétrica da nova central em ritmo total = R\$ 1.131.858,34.
- Redução do custo de R\$ 568.342,51 (-33,43%).
- Custo anual de energia elétrica da antiga central em ritmo parcial = R\$ 1.227.629,01.
- Custo anual de energia elétrica da nova central em ritmo parcial = R\$ 817.257,64.
- Redução do custo de R\$ 410.371,37 (-33,43%).

Figura 17 - Comparativo do custo de energia



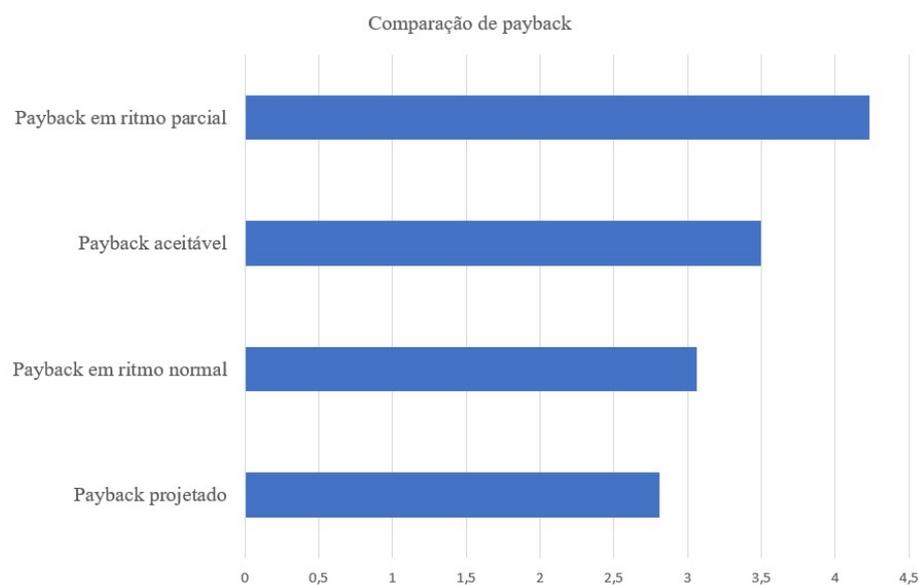
Fonte: autor

4.5.3.3 Comparação do payback

A partir do valor do investimento de 1.737.400,00 e com a redução de custo com energia elétrica das centrais em ritmo normal e parcial.

- Payback projetado em relação as capacidades nominais da nova central = 2,81 anos.
- Payback aceitável pela fábrica = 3,5 anos.
- Payback em ritmo normal = 3,06 anos.
- Payback em ritmo parcial = 4,23 anos.

Figura 18 - Comparativo dos paybacks



Fonte: autor

5 CONCLUSÃO

Os objetivos estabelecidos desse estudo foram alcançados visto que foi possível identificar na segunda medição do perfil de consumo que a potência específica da nova central de ar comprimido foi de 0,0938 kWh/m³, superando o valor de benchmarking idealizado (0,095 kWh/m³) que possibilitou uma redução energética de 33,43% na produção de ar comprimido. Outro objetivo completado foi o *payback* sobre o investimento, uma vez que o aceitável pela fábrica em estudo fosse de 3,5 anos e o medido foi de 3,06 anos, considerando em ritmos normais de consumo de ar comprimido.

Foi possível responder o questionamento impulsionador levantado anteriormente, que para se obter ganhos de eficiência energética na substituição de compressores o ideal é que primeiramente seja verificado a quantidade de vazamentos presente na rede de ar comprimido sendo o aceitável de 5% até 10% da capacidade nominal dos compressores, após essa validação seguir para medição do perfil de consumo e entender como é a demanda de ar comprimido e assim especificar compressores que resultem numa potência específica adequada com a tecnologia de unidade de compressão. Caso sejam utilizados compressores de parafusos a opção de duplo estágio sendo as mais eficientes e para grandes vazões, compressores centrífugos devem ser considerados no estudo.

Pode ser destacado os principais resultados obtidos com a implementação da nova central em comparação com a central antiga, considerando ambas trabalhando em ritmo normal de produção: economia anual de energia de 2.471.054,40 kWh, redução no custo de energia elétrica anual de R\$ 1.700.200,85, redução de 33,43% da potência específica. Além disso foi apontado pela equipe de engenharia e manutenção da fábrica outros resultados positivos, como a redução do custo com manutenção devido a menor quantidade de máquinas e operação mais balanceada, também um ar sem presença de condensado e com maior qualidade já que a nova central apresenta sistema de tratamento com secadores e filtros.

Como limitações deste estudo destaca-se a dificuldade de encontrar materiais que abordam conhecimentos específicos em centrais de ar comprimido e o levantamento do consumo de ar em diferentes momentos em que se está analisando o sistema. Espera-se que esse trabalho seja utilizado por profissionais de engenharia que atuam no segmento industrial em situações de substituição de compressores que visam aumentar a eficiência energética na produção de ar comprimido.

Vale ressaltar a importância deste estudo na formação profissional e acadêmica do autor, no qual foi abordado um tema de extrema relevância da Engenharia Mecânica relacionado ao uso de ar comprimido industrial.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Parametrizar sistema de controle da central de ar comprimido.
- Analisar a perda de carga da rede de distribuição do ar comprimido.
- Realizar estudo da recuperação de calor na sala de compressores.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

ATLAS COPCO “Compressed Air Manual”; Atlas Copco; Belgium; 137-p.; 2015.

ATLAS COPCO. **O que é ar comprimido?** Por que usamos ar comprimido? Online: Atlas Copco, 2020. Disponível em: <https://www.atlascopco.com/pt-br/compressors/wiki/compressed-air-articles/what-is-compressed-air#:~:text=O%20custo%20equivalente%20do%20ar,devido%20%C3%A0%20simplicidade%20do%20projeto>. Acesso em: 5 fev. 2023.

ATLAS COPCO. Compressor: Ar Comprimido. In: ATLAS COPCO. **Compressor de pistão x compressor de parafuso: qual o melhor para pequenas e médias empresas?** Online: Atlas Copco, 2020. Disponível em: <https://www.atlascopco.com/pt-br/compressors/air-compressor-blog/compressor-pistao-parafuso-pequenas-medias-empresas#:~:text=O%20compressor%20de%20parafuso%20consome%20menos%20energia&text=Maior%20vaz%C3%A3o%20efetiva%3A%20o%20compressor,ar%20e%20consome%20mais%20energia>. Acesso em: 6 jan. 2023.

CAMÊLO CAVALCANTI, E.S. Uso do ar comprimido no setor industrial: Análise de oportunidades de redução do consumo de energia. **SNPTEE Seminário Nacional de Produção de Transmissão de Energia Elétrica**. Uberlândia (MG), outubro 2003, 6p.

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

DUCCI OLESKO H. **Uma Proposta de Eficiência Energética de Ar Comprimido Industrial**. 2013. Monografia de Especialização – Universidade Tecnológica do Paraná, Curitiba, 2013.

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

INGERSOLL RAND, 2013. Disponível em < <https://www.ingersollrand.com/en-us/air-compressor/oil-flooded-air-compressors/ssr-two-stage> > Acesso em 02/01/23.

PARKER; “Dimensionamento de Redes de Ar Comprimido”; Apostila M1004 BR; Jacareí; Brasil; 72 - p.; 2006.

PARKER; “Tecnologia Pneumática Industrial”; Revisão 1; Jacareí; Brasil; 196 - p.; 2007.

PROCEL. Compressores. Brasil. Guia Básico, 2009. 138p.

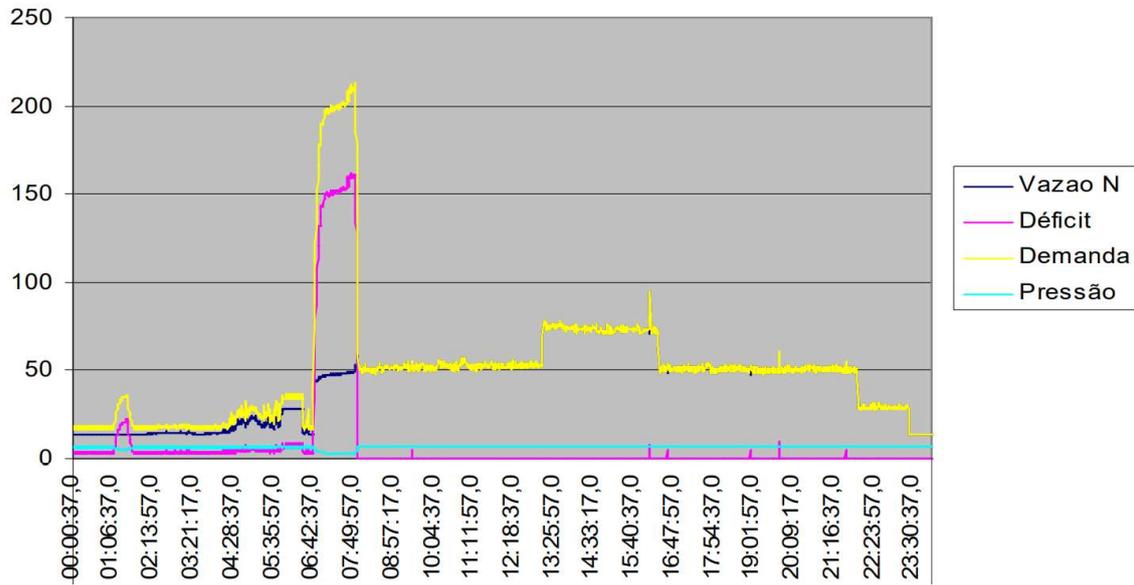
PROCEL. Eficiência Energética em Sistemas de Ar Comprimido. Brasil: Manual Prático, 2005. 86 Páginas.

RAMIRES ALVES G. **Eficiência energética em um sistema de ar comprimido**. 2018. Monografia de graduação – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

US DOE – United State Department of Energy. Improving Compressed Air System Performance – A Soucerbook for Industry, 3^a ed, 2016. Disponível em <https://www1.eere.energy.gov/manufacturing/tech_assistance/pdfs/compressed_air_sourcebook.pdf> Acesso em 09/01/23.

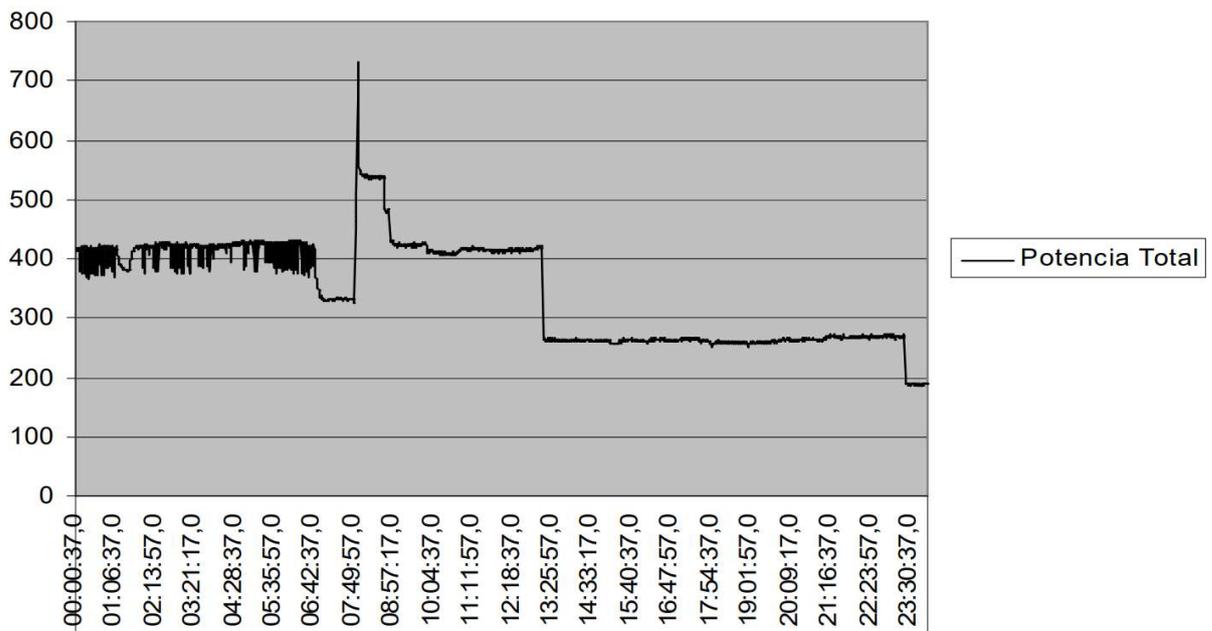
ANEXO A – Gráficos da Geração de Ar Comprimido da Central Principal

Figura 19 - Medição da Pressão e Vazão da Central Principal (1º dia)



Fonte: autor

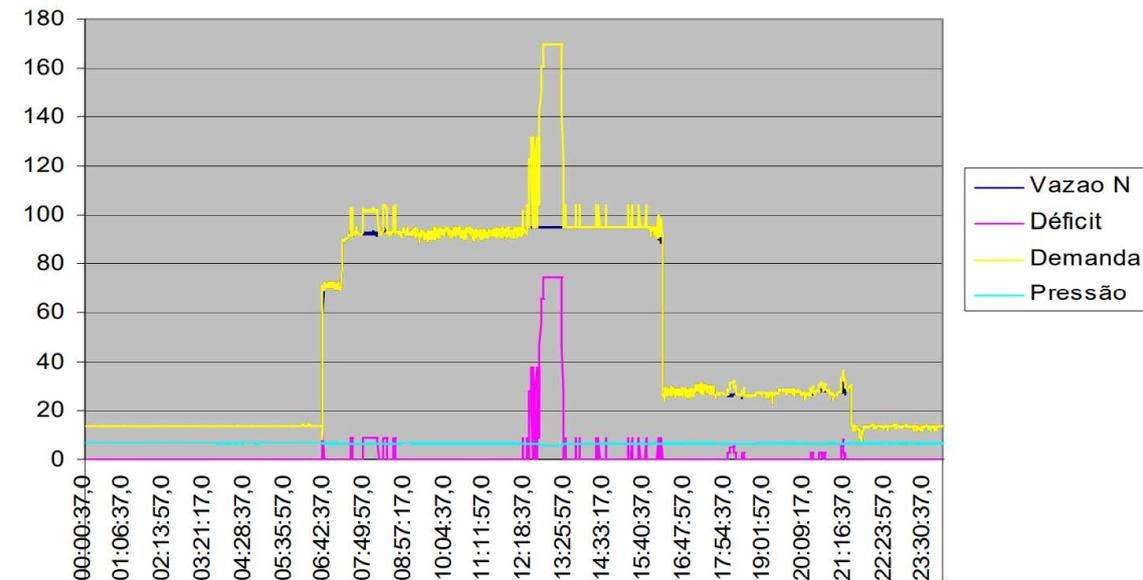
Figura 20 - Medição da Potência (1º dia)



Fonte: autor

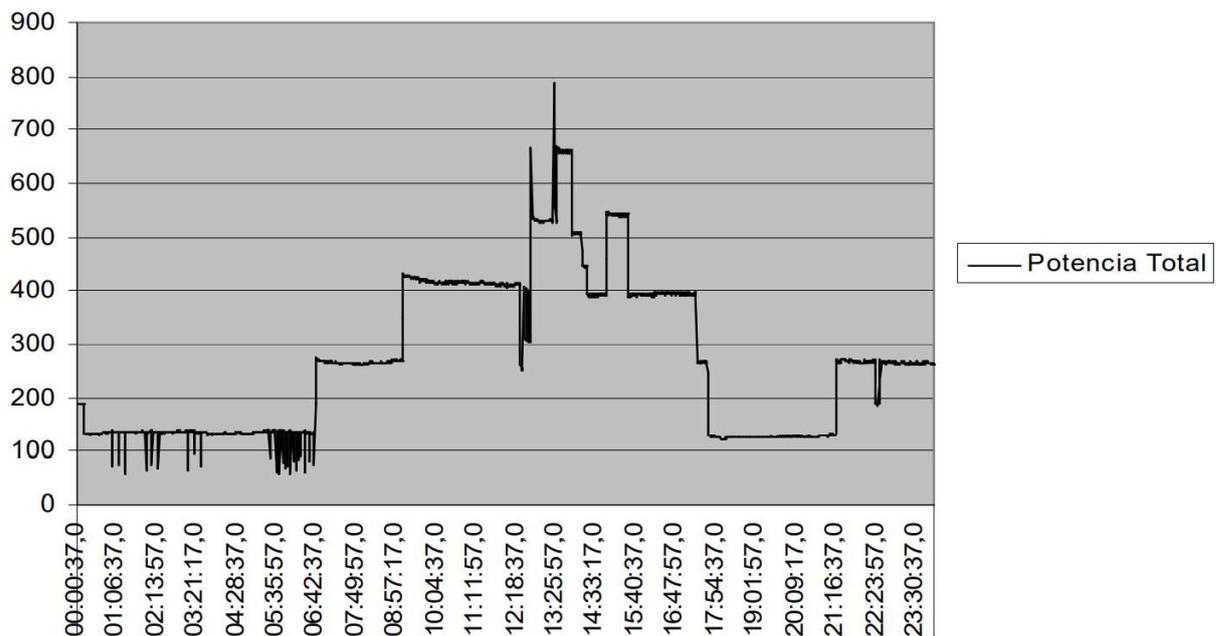
ANEXO A – Gráficos da Geração de Ar Comprimido da Central Principal (continuação)

Figura 21 - Medição da Pressão e Vazão da Central Principal (2º dia)



Fonte: autor

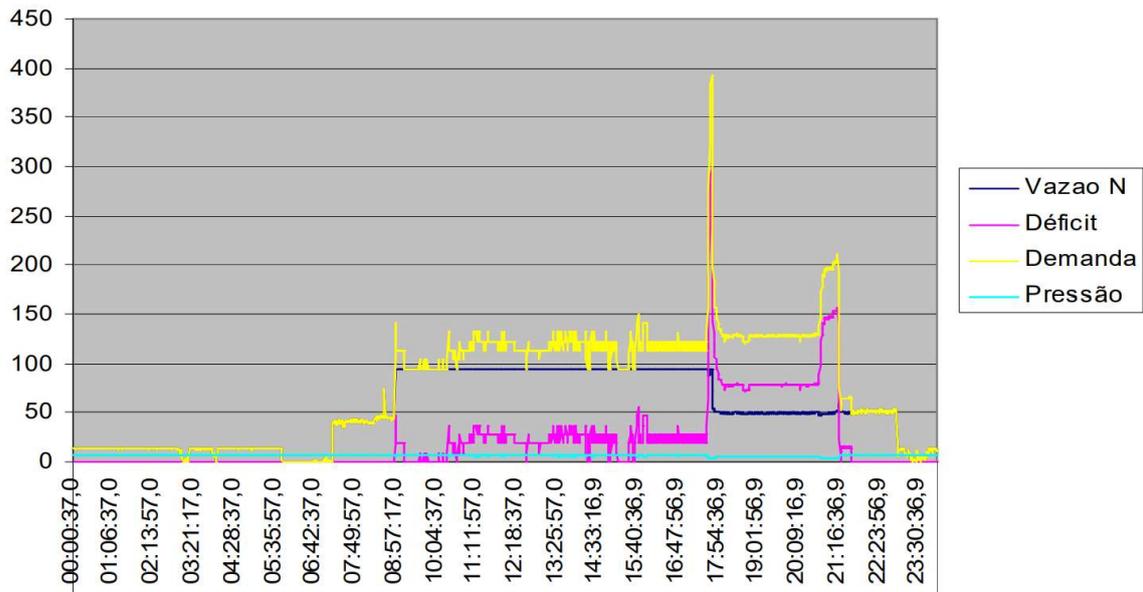
Figura 22 - Medição da Potência (2º dia)



Fonte: autor

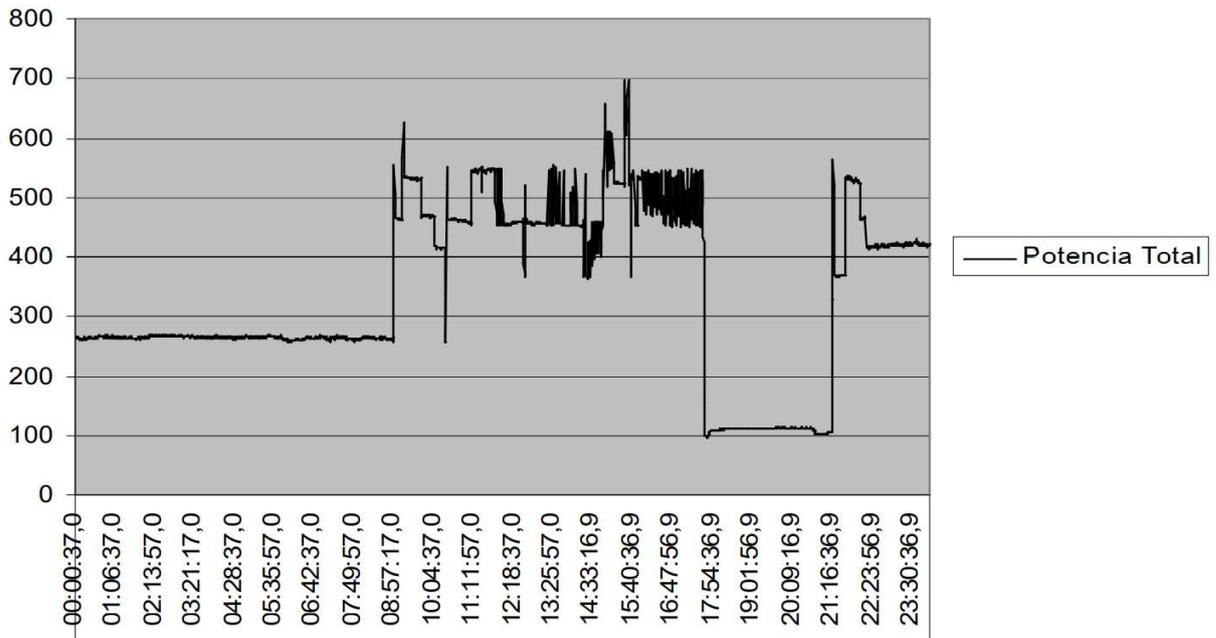
ANEXO A – Gráficos da Geração de Ar Comprimido da Central Principal (continuação)

Figura 23 - Medição da Pressão e Vazão da Central Principal (3º dia)



Fonte: autor

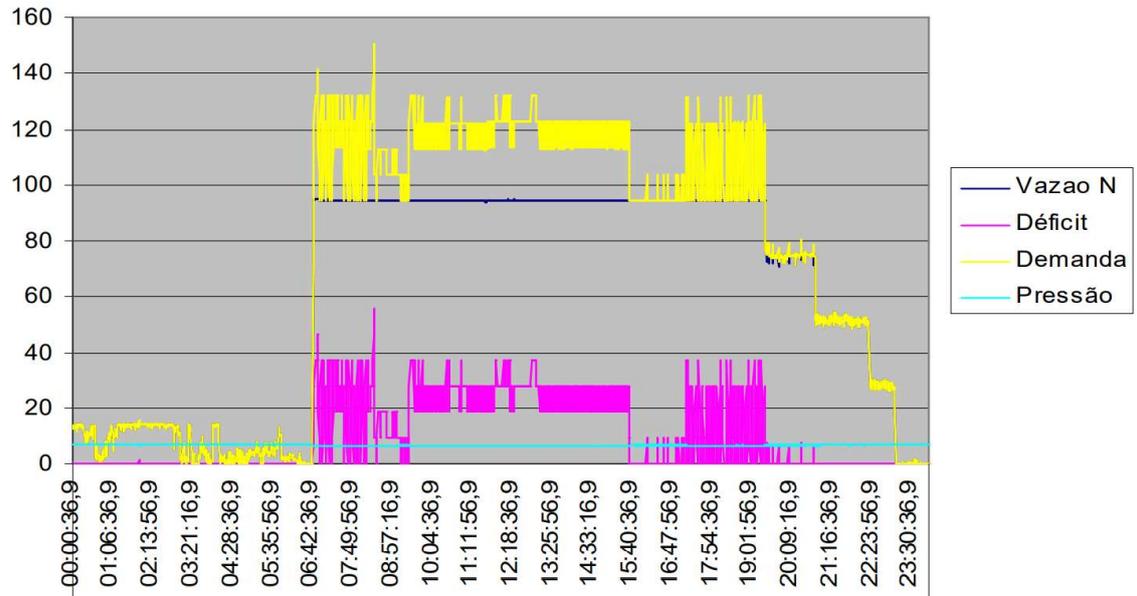
Figura 24 - Medição da Potência (3º dia).



Fonte: autor

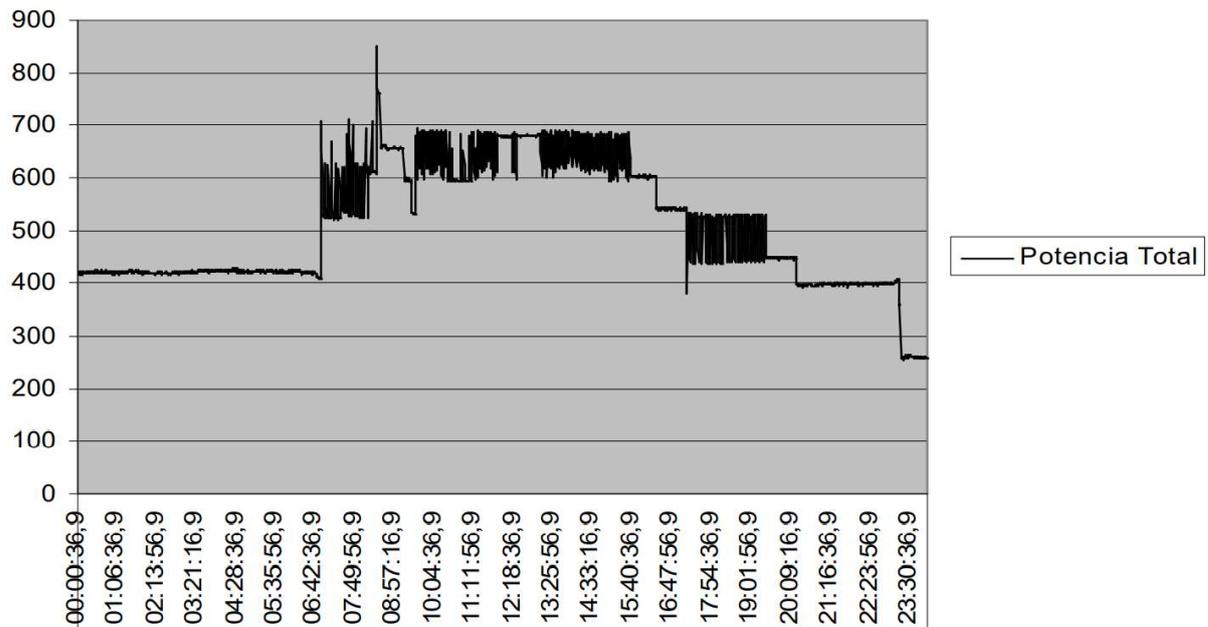
ANEXO A – Gráficos da Geração de Ar Comprimido da Central Principal (continuação)

Figura 25 - Medição da Pressão e Vazão da Central Principal (4º dia)



Fonte: autor

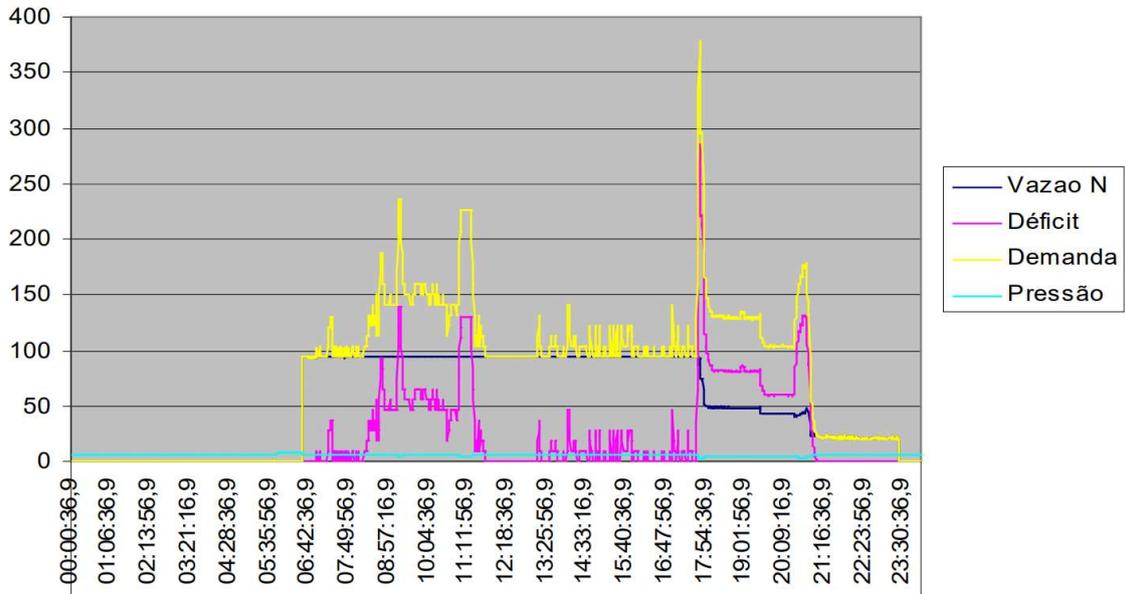
Figura 26 - Medição da Potência (4º dia)



Fonte: autor

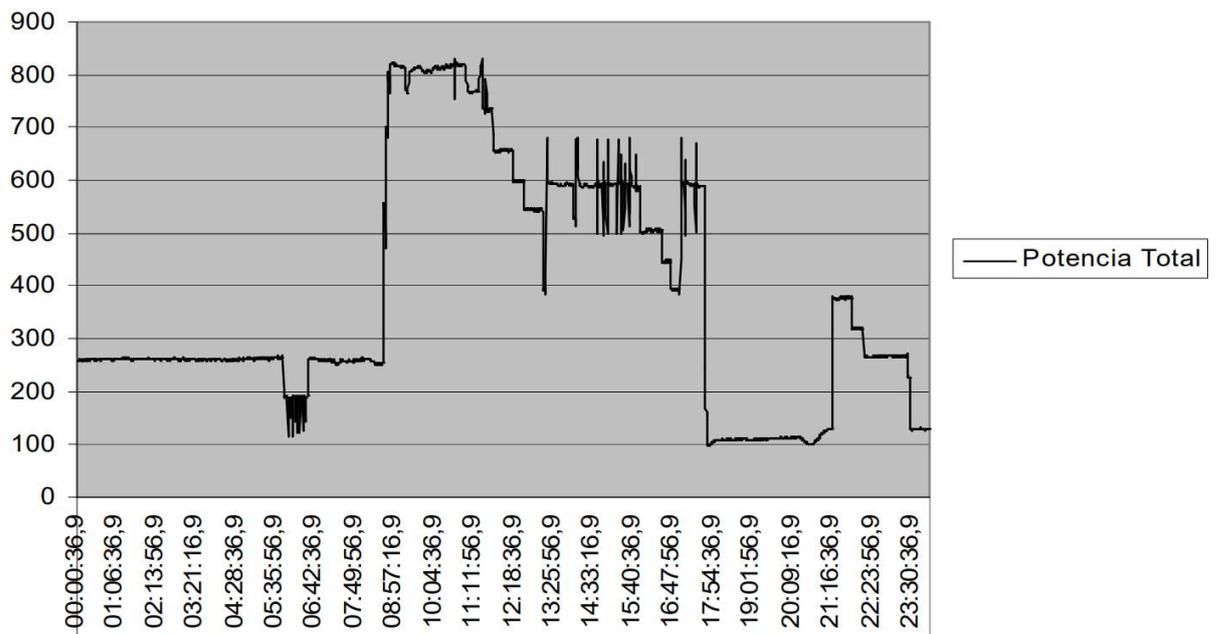
**ANEXO A – Gráficos da Geração de Ar Comprimido da Central Principal
(continuação)**

Figura 27 - Medição da Pressão e Vazão da Central Principal (5° dia)



Fonte: autor

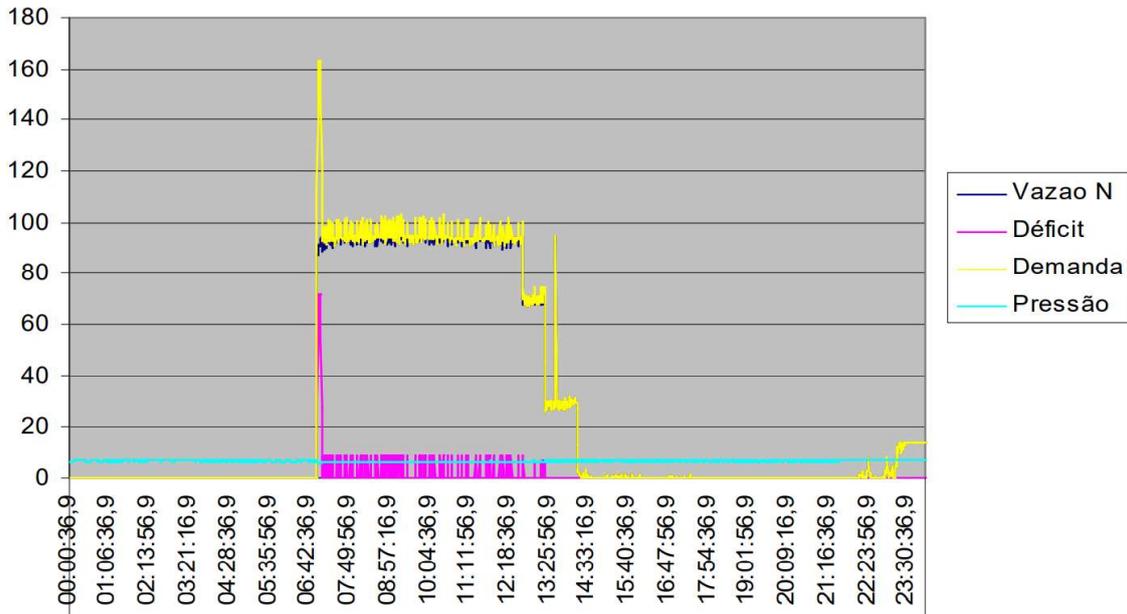
Figura 28 - Medição da Potência (5° dia)



Fonte: autor

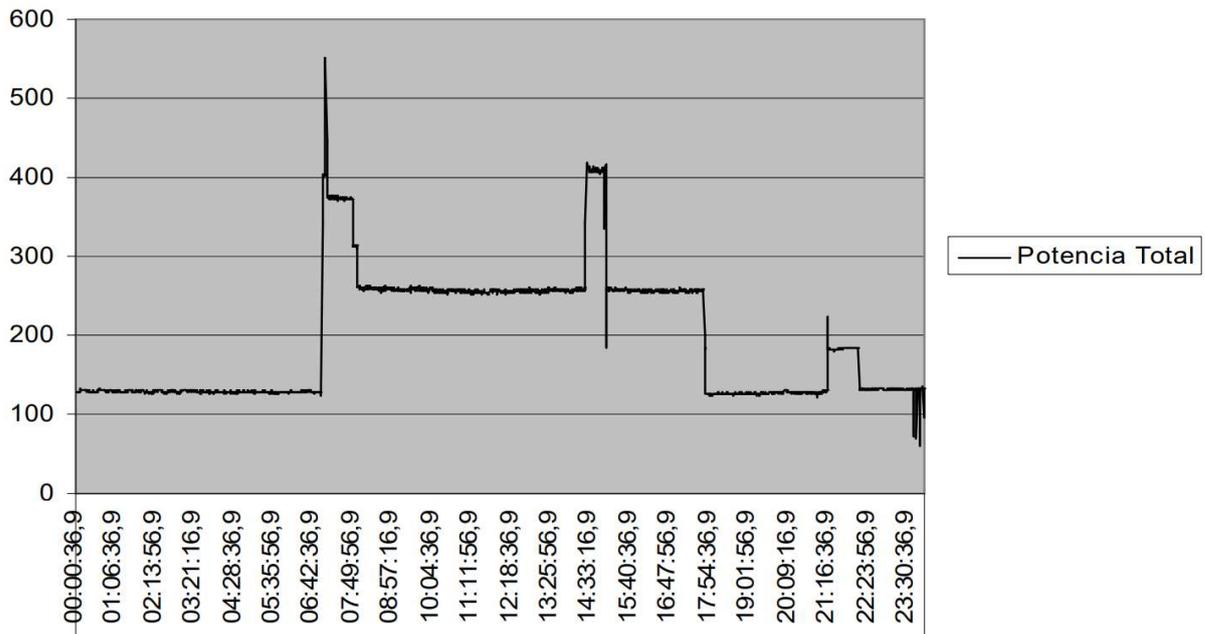
ANEXO A – Gráficos da Geração de Ar Comprimido da Central Principal (continuação)

Figura 29 - Medição da Pressão e Vazão da Central Principal (6º dia)



Fonte: autor

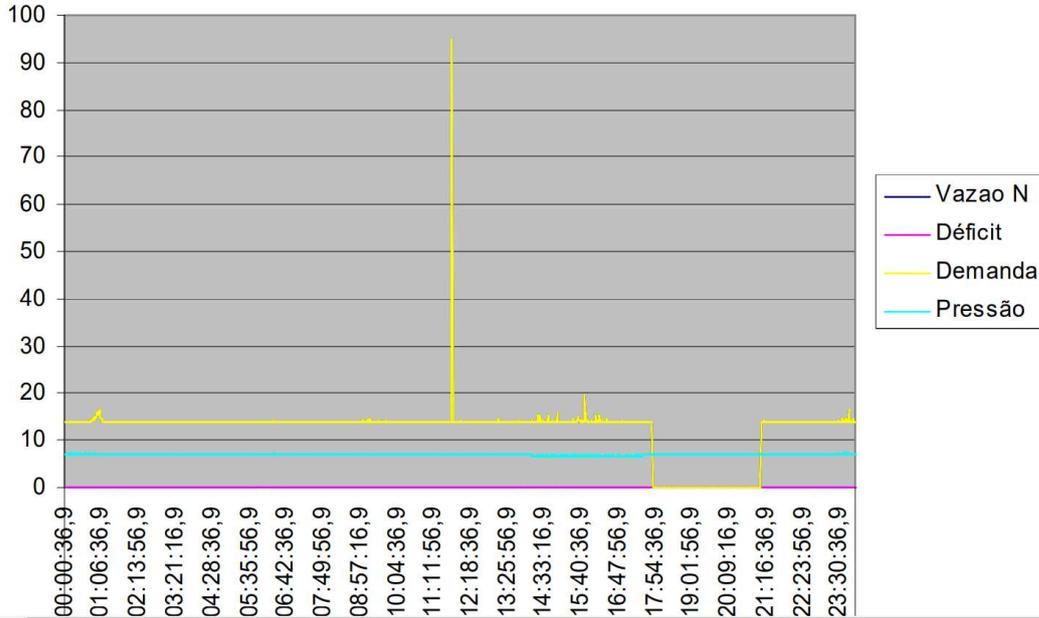
Figura 30 - Medição de Potência (6º dia)



Fonte: autor

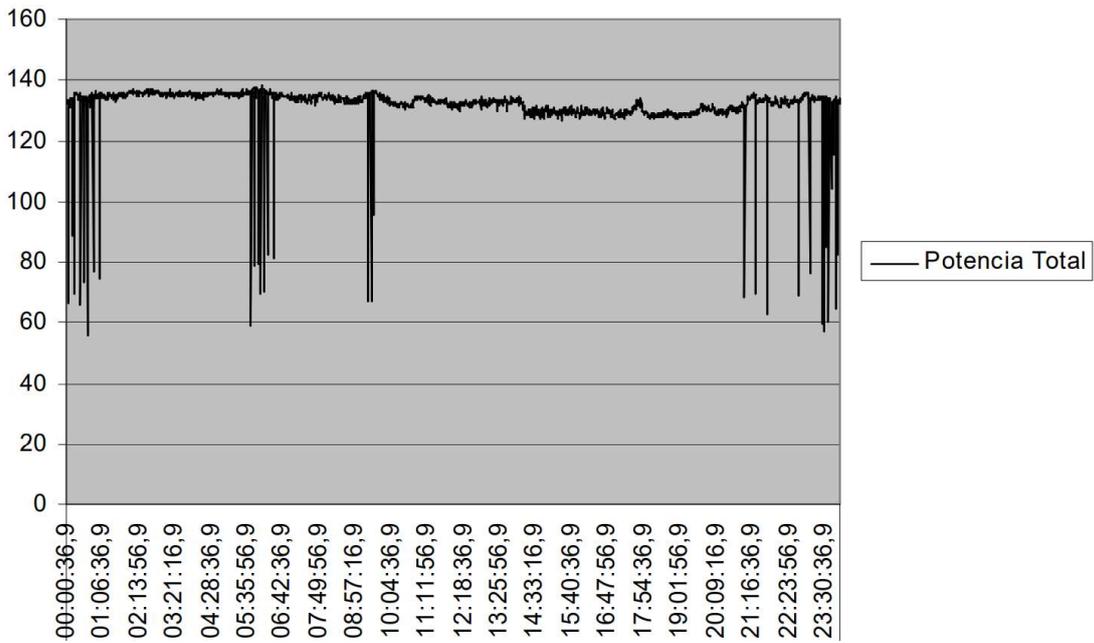
**ANEXO A – Gráficos da Geração de Ar Comprimido da Central Principal
(continuação)**

Figura 31 - Medição da Pressão e Vazão da Central Principal (7º dia)



Fonte: autor

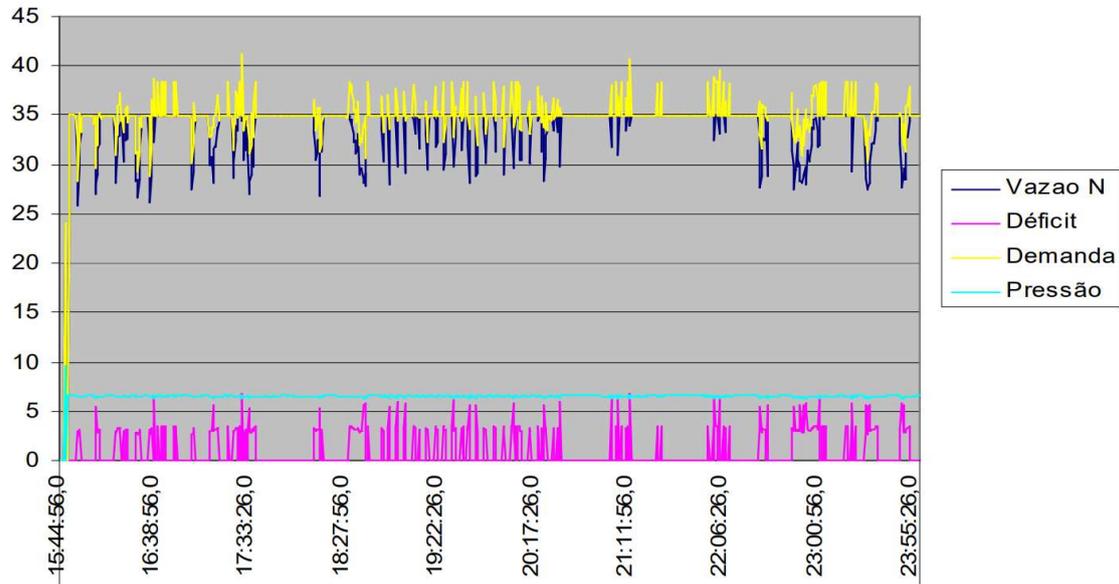
Figura 32 - Medição de Potência (7º dia)



Fonte: autor

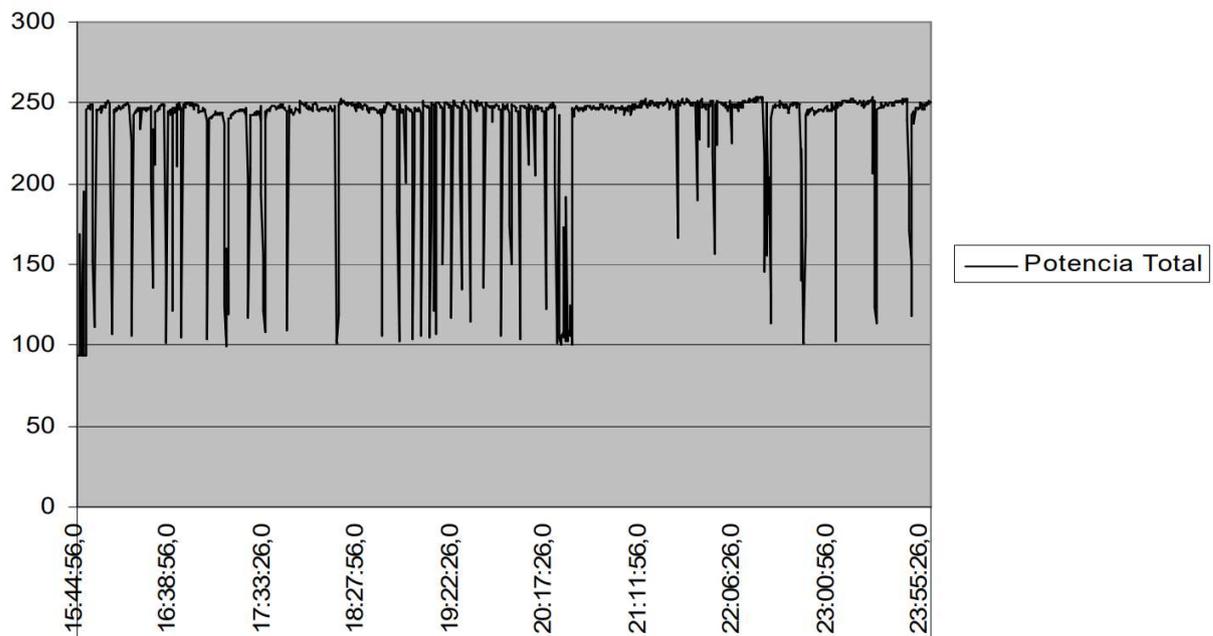
ANEXO B – Gráficos da Geração de Ar Comprimido da Central Secundária

Figura 33 - Medição da Pressão e Vazão da Central Secundária (1º dia)



Fonte: autor

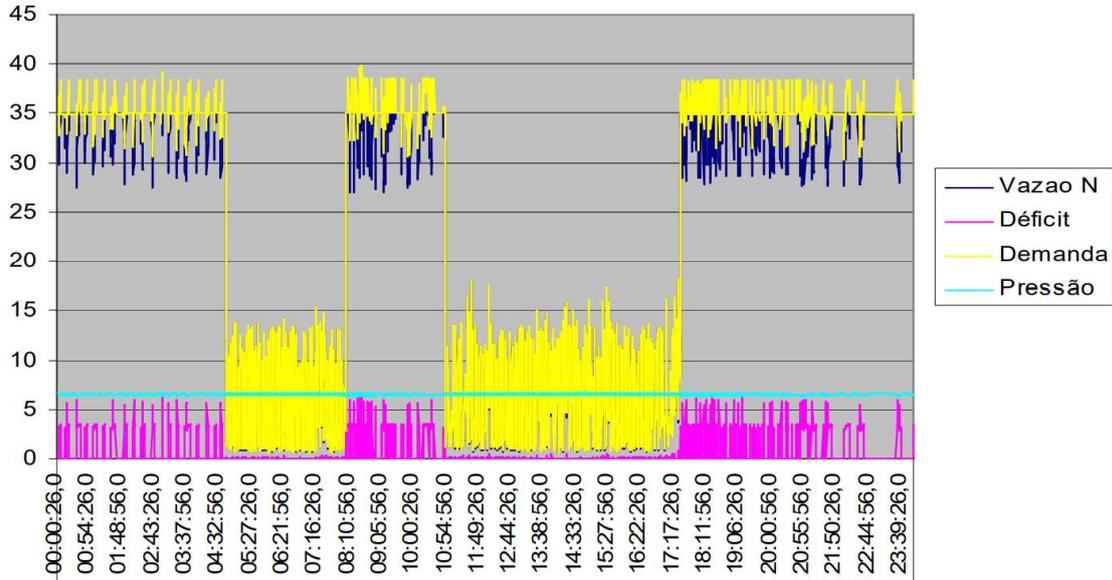
Figura 34 - Medição de Potência da Central Secundária (1º dia)



Fonte: autor

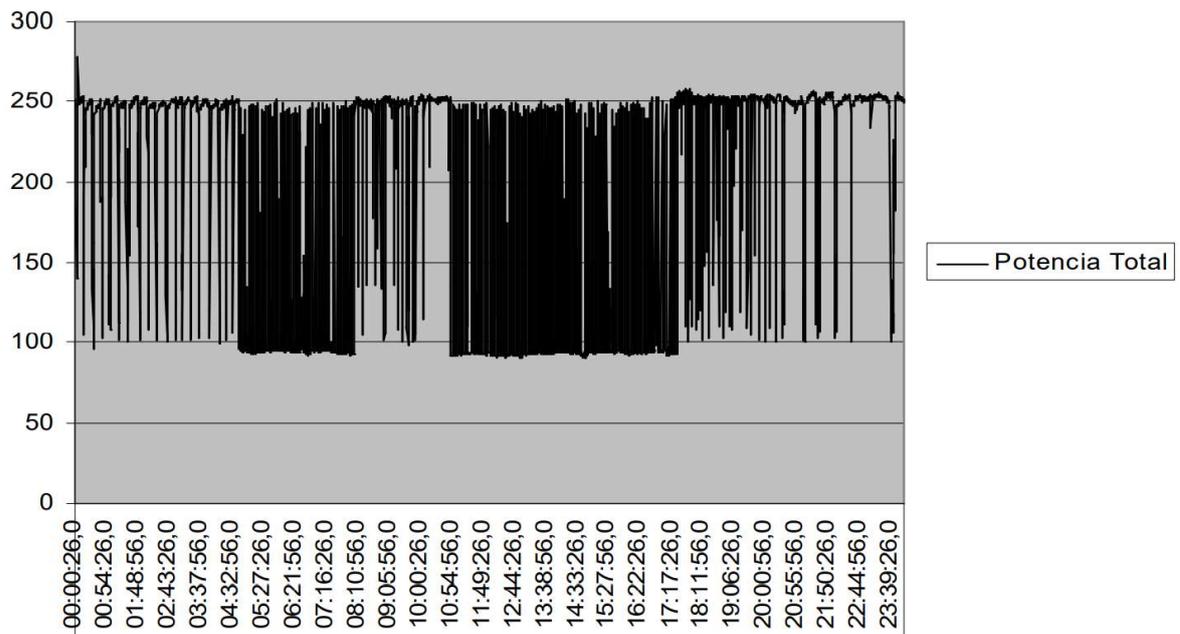
ANEXO B – Gráficos da Geração de Ar Comprimido da Central Secundária (continuação)

Figura 35 - Medição da Pressão e Vazão da Central Secundária (2º dia)



Fonte: autor

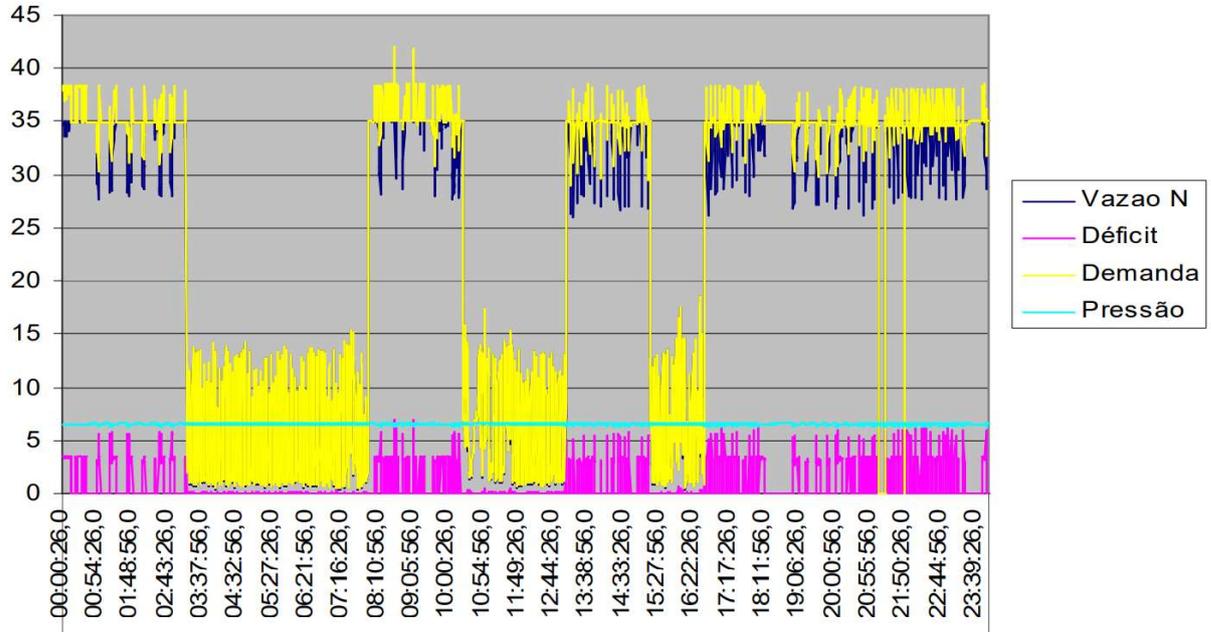
Figura 36 - Medição de Potência da Central Secundária (2º dia)



Fonte: autor

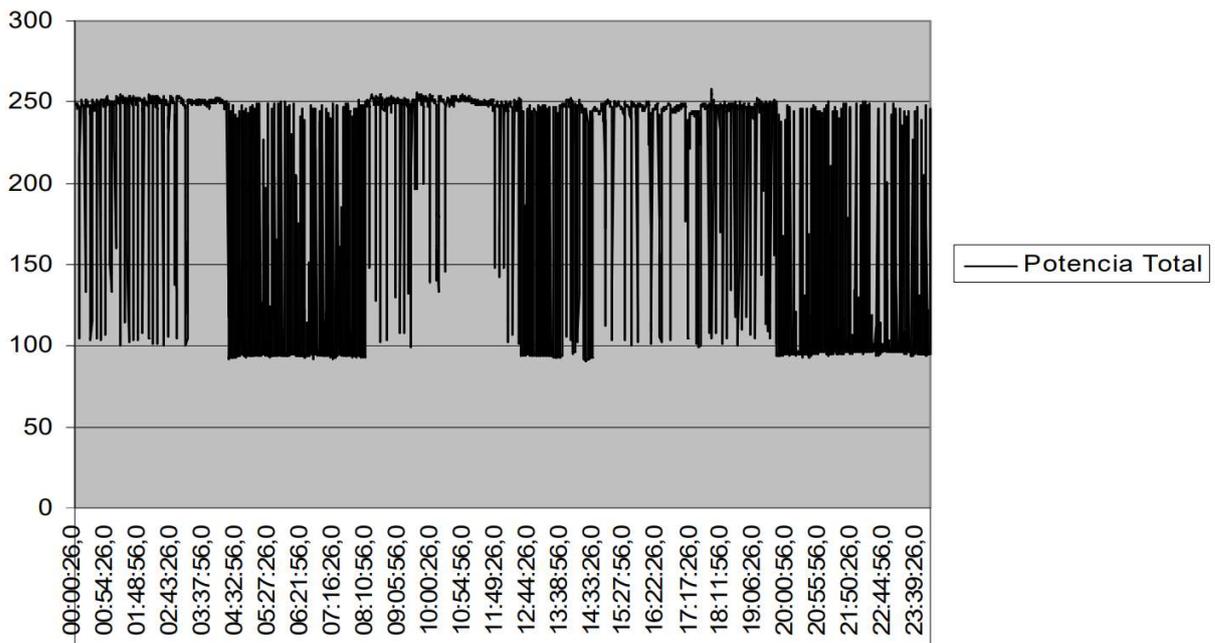
**ANEXO B – Gráficos da Geração de Ar Comprimido da Central Secundária
(continuação)**

Figura 37 - Medição da Pressão e Vazão da Central Secundária (3º dia)



Fonte: autor

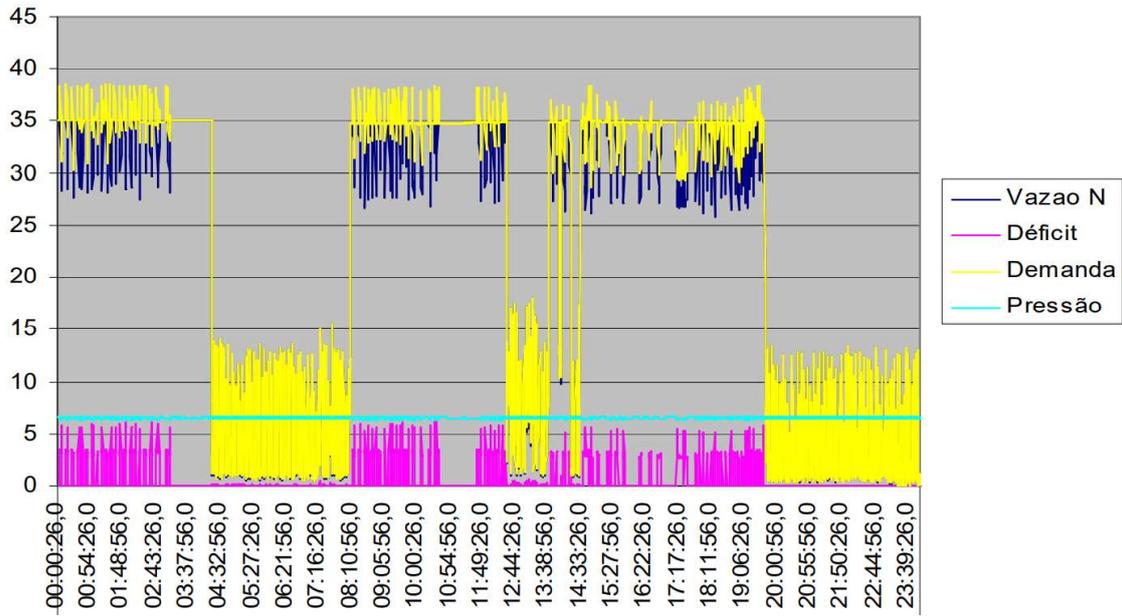
Figura 38 - Medição de Potência da Central Secundária (3º dia)



Fonte: autor

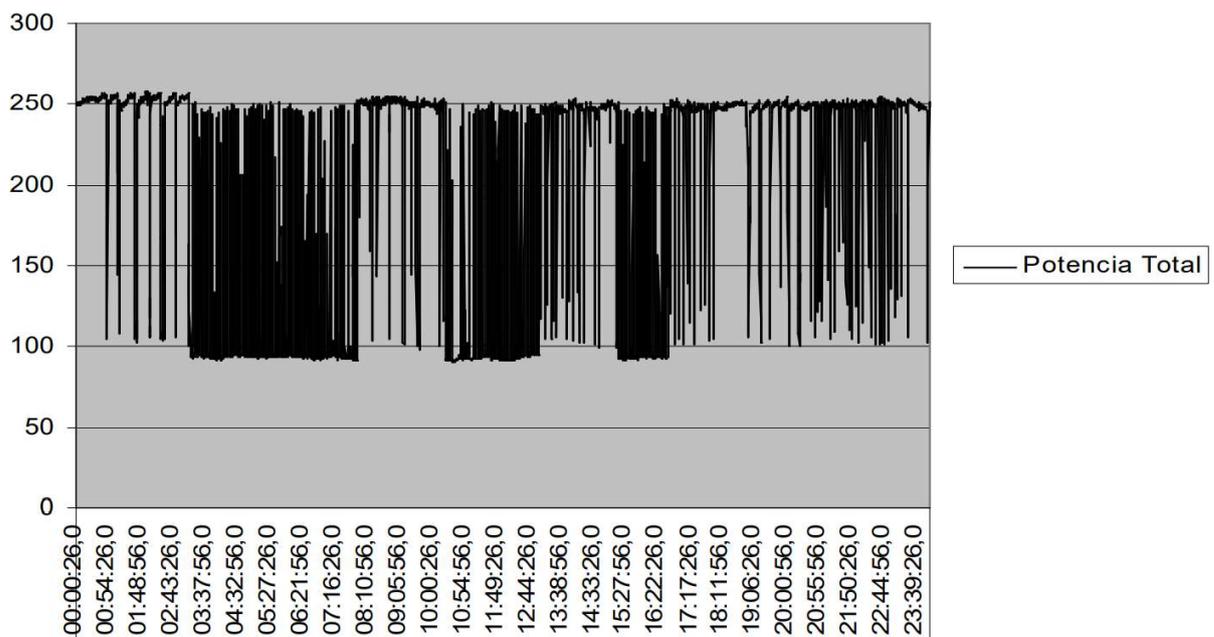
ANEXO B – Gráficos da Geração de Ar Comprimido da Central Secundária (continuação)

Figura 39 - Medição da Pressão e Vazão da Central Secundária (4º dia)



Fonte: autor

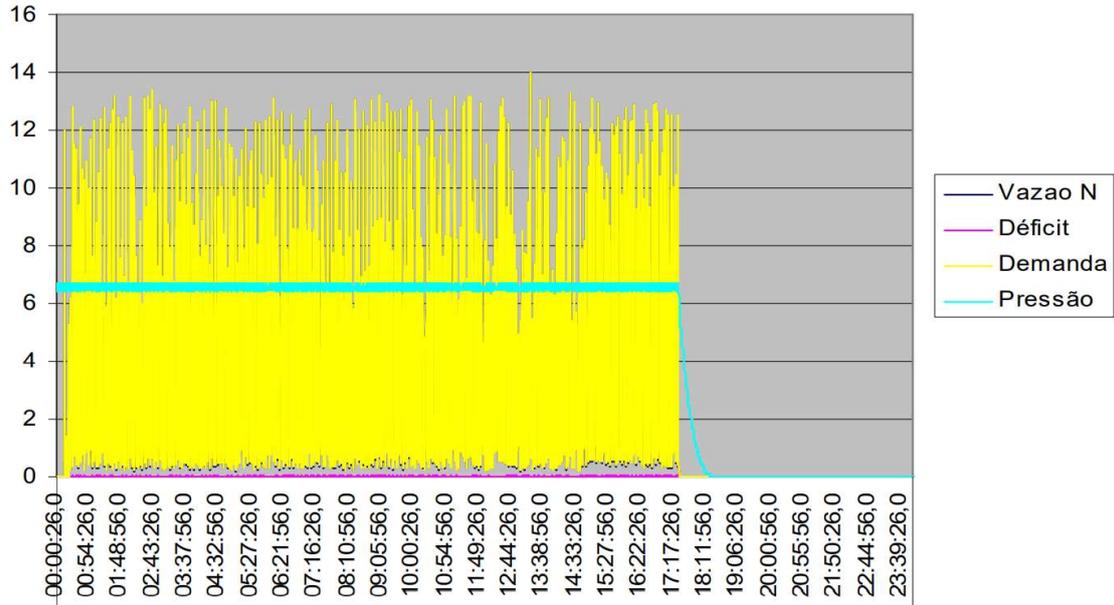
Figura 40 - Medição de Potência da Central Secundária (4º dia)



Fonte: autor

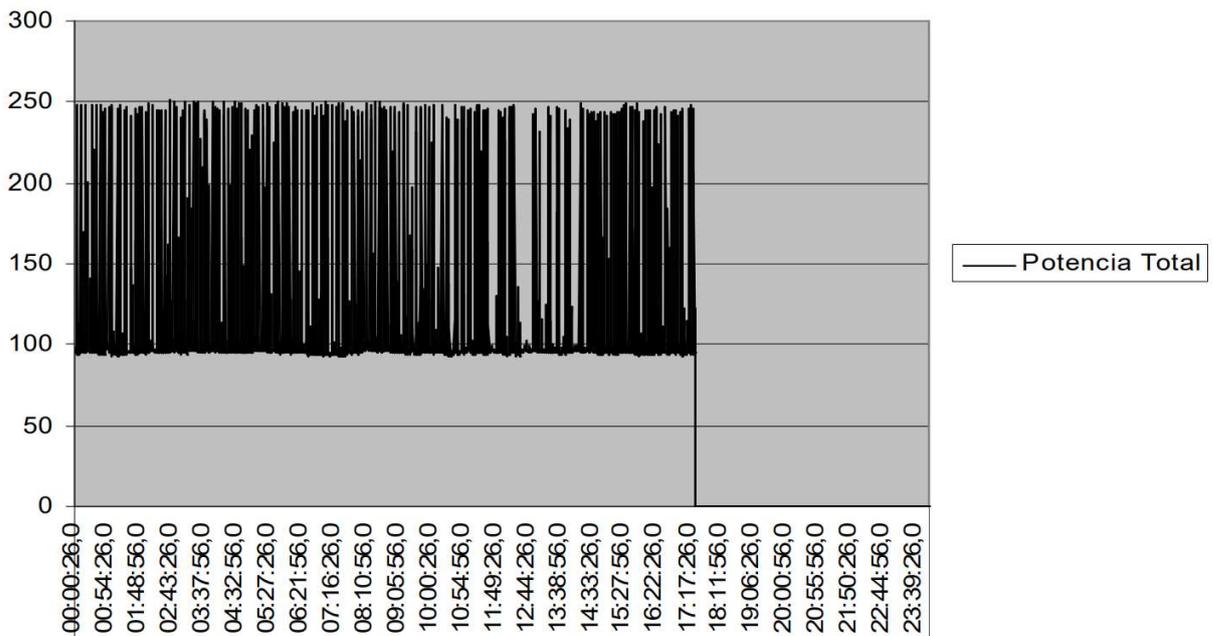
ANEXO B – Gráficos da Geração de Ar Comprimido da Central Secundária (continuação)

Figura 41 - Medição da Pressão e Vazão da Central Secundária (5º dia)



Fonte: autor

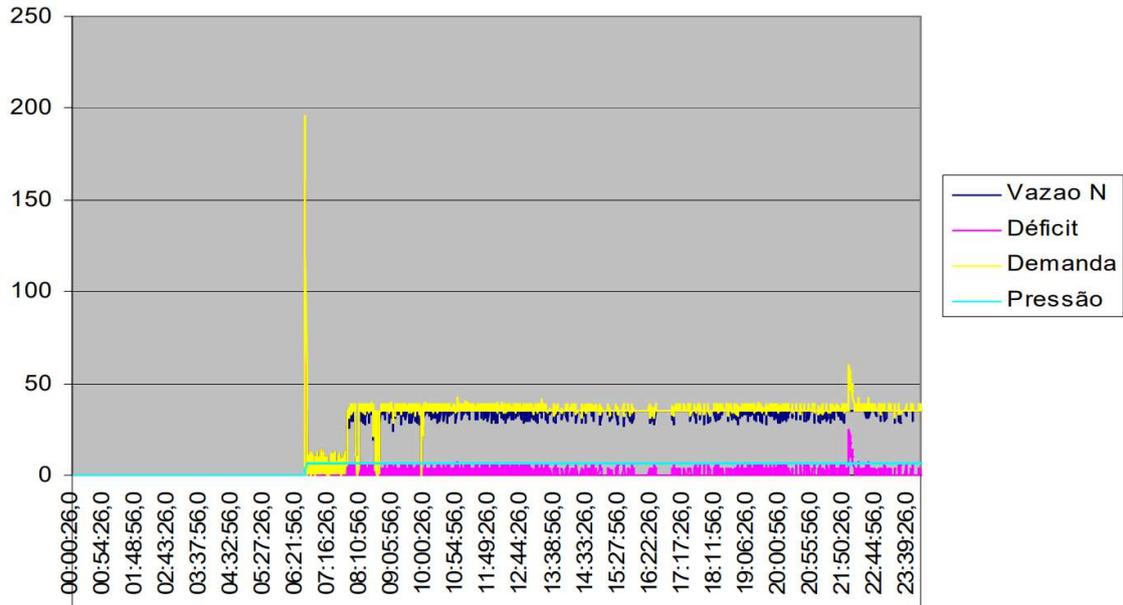
Figura 42 - Medição de Potência da Central Secundária (5º dia)



Fonte: autor

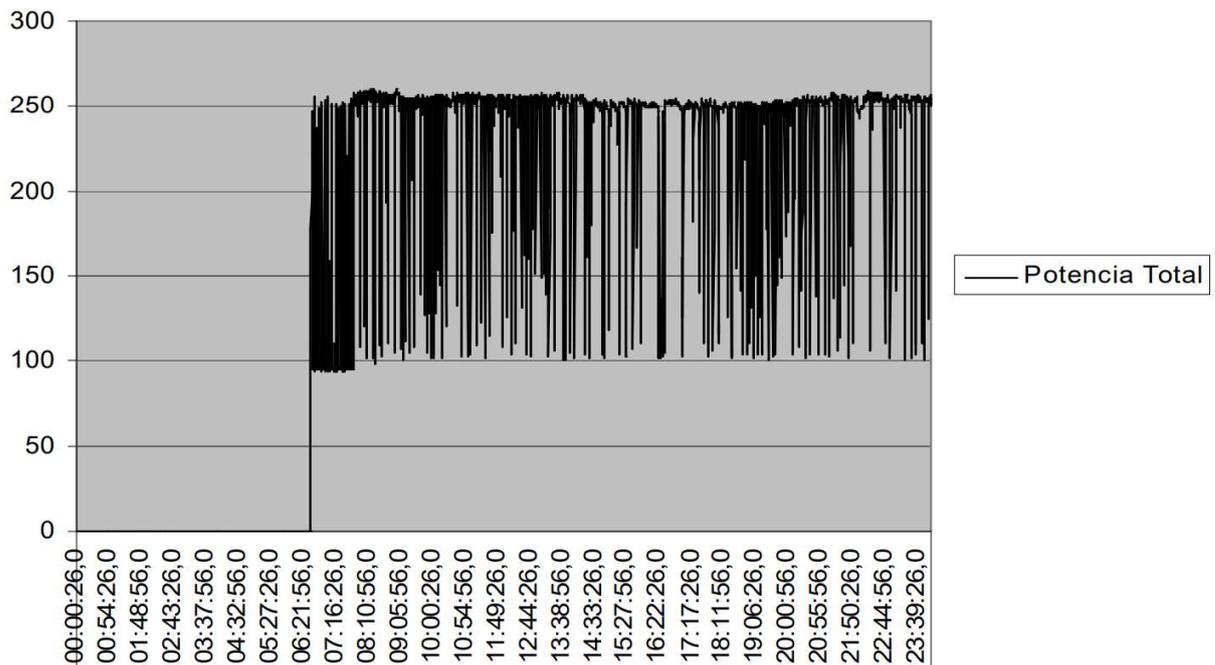
**ANEXO B – Gráficos da Geração de Ar Comprimido da Central Secundária
(continuação)**

Figura 43 - Medição da Pressão e Vazão da Central Secundária (6º dia)



Fonte: autor

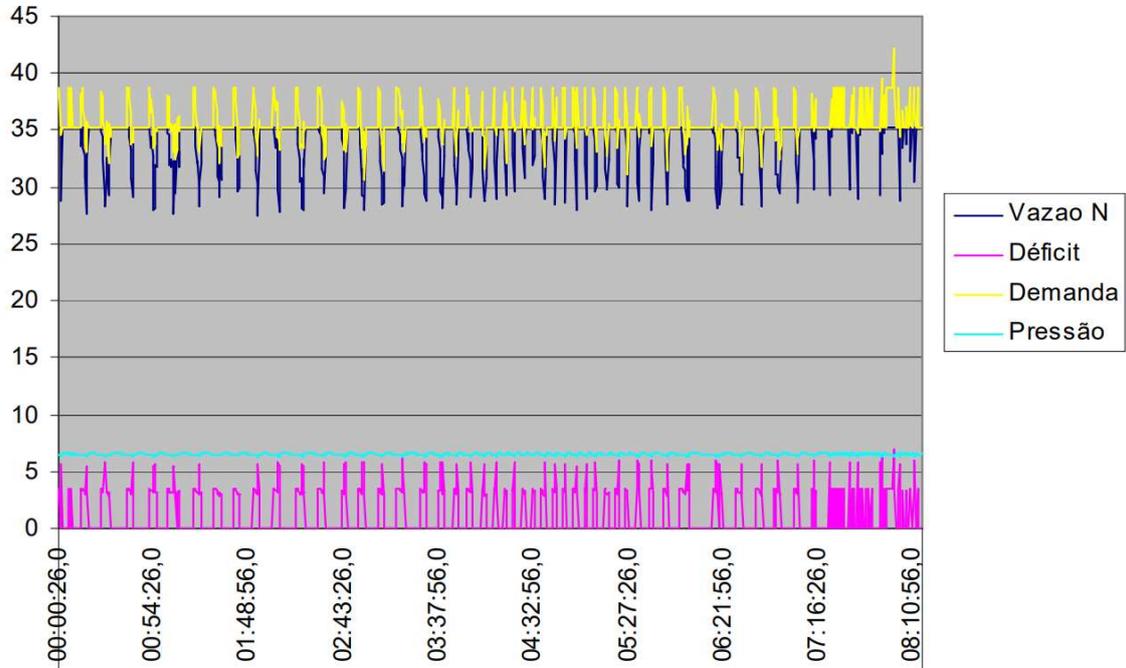
Figura 44 - Medição de Potência da Central Secundária (6º dia)



Fonte: autor

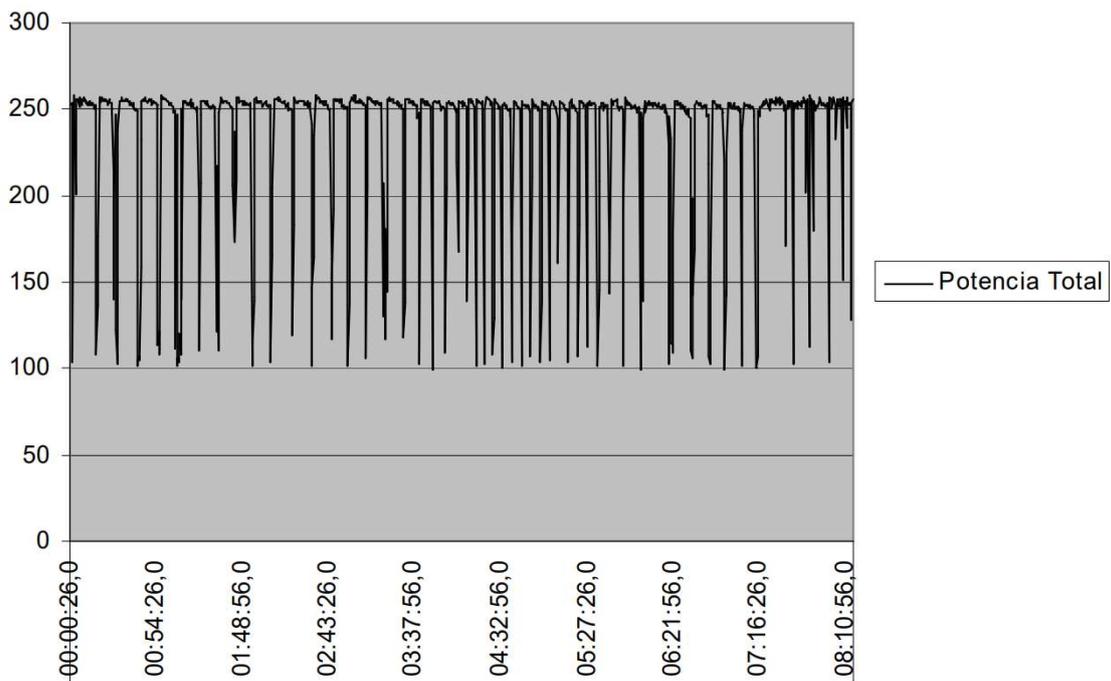
ANEXO B – Gráficos da Geração de Ar Comprimido da Central Secundária (continuação)

Figura 45 - Medição da Pressão e Vazão da Central Secundária (7º dia)



Fonte: autor

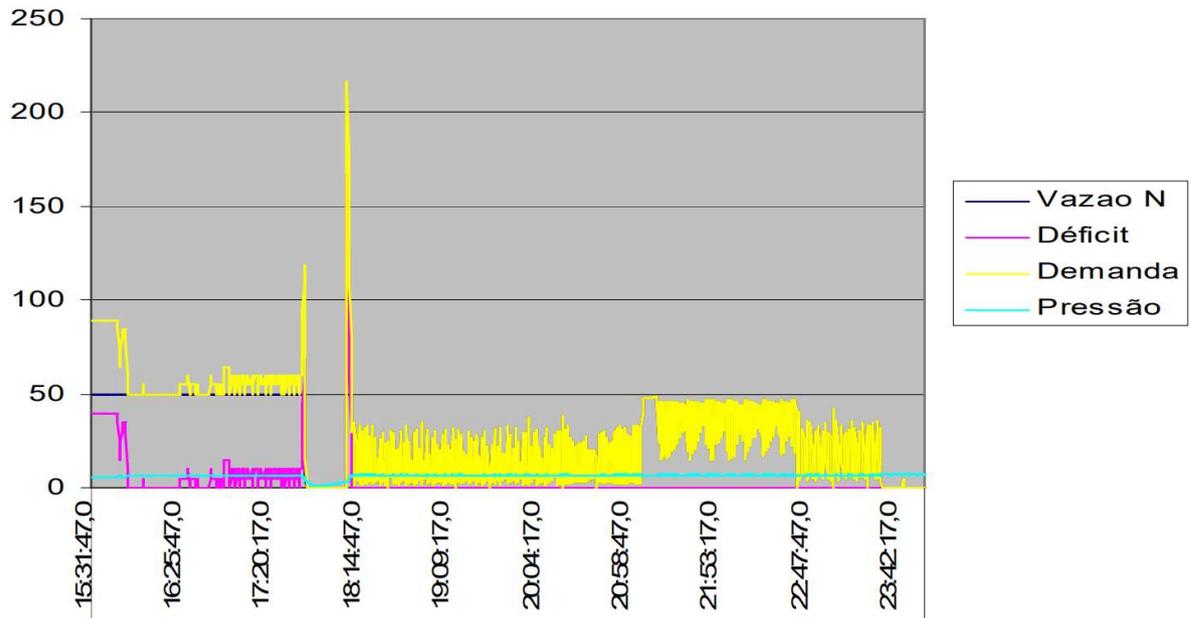
Figura 46 - Medição de Potência da Central Secundária (7º dia)



Fonte: autor

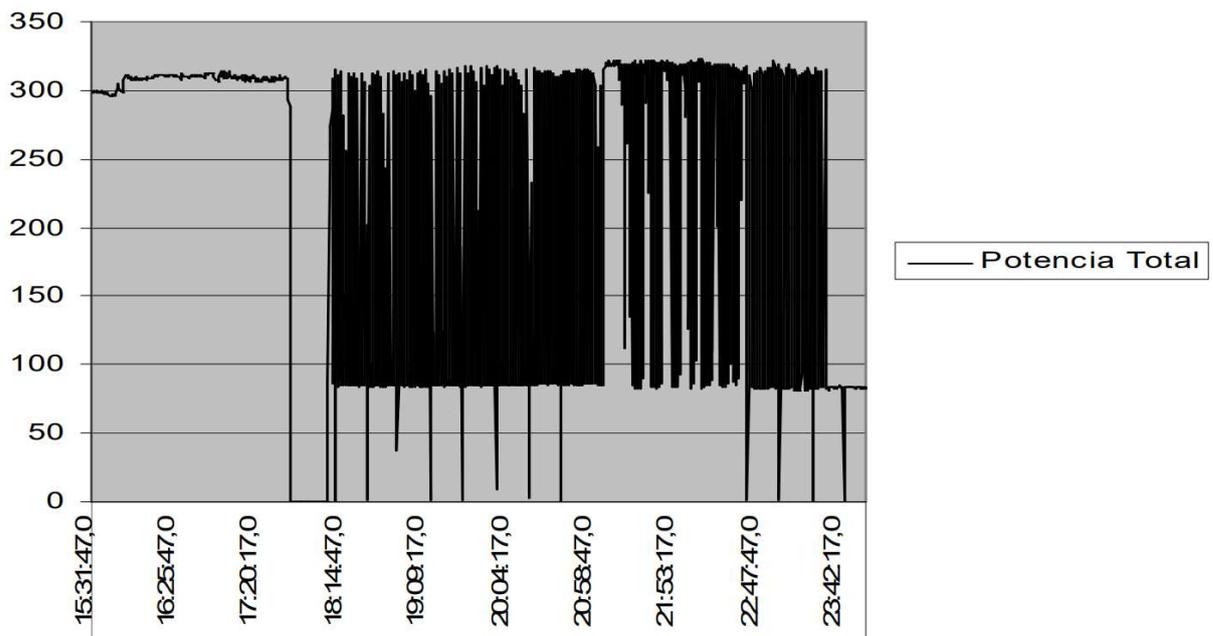
ANEXO C – Gráficos da Geração de Ar Comprimido Compressor ZR 5

Figura 47 - Medição da Pressão e Vazão do ZR 5 (1º dia)



Fonte: autor

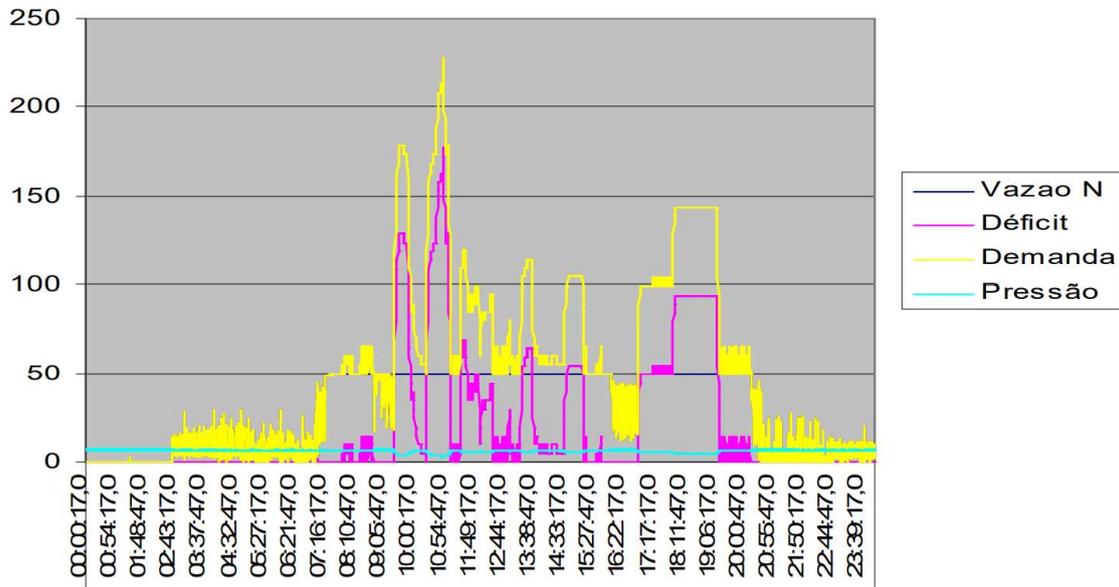
Figura 48 - Medição de Potência do ZR 5 (1º dia)



Fonte: autor

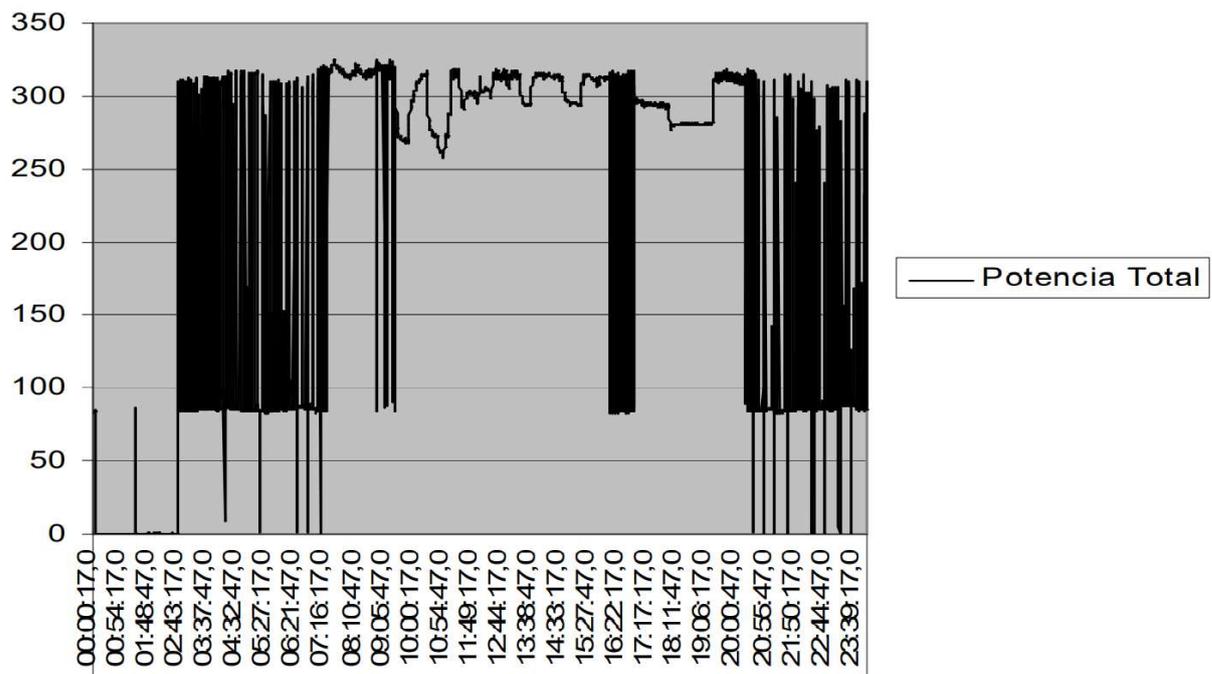
ANEXO C – Gráficos da Geração de Ar Comprimido Compressor ZR 5 (continuação)

Figura 49 - Medição da Pressão e Vazão do ZR 5 (2º dia)



Fonte: autor

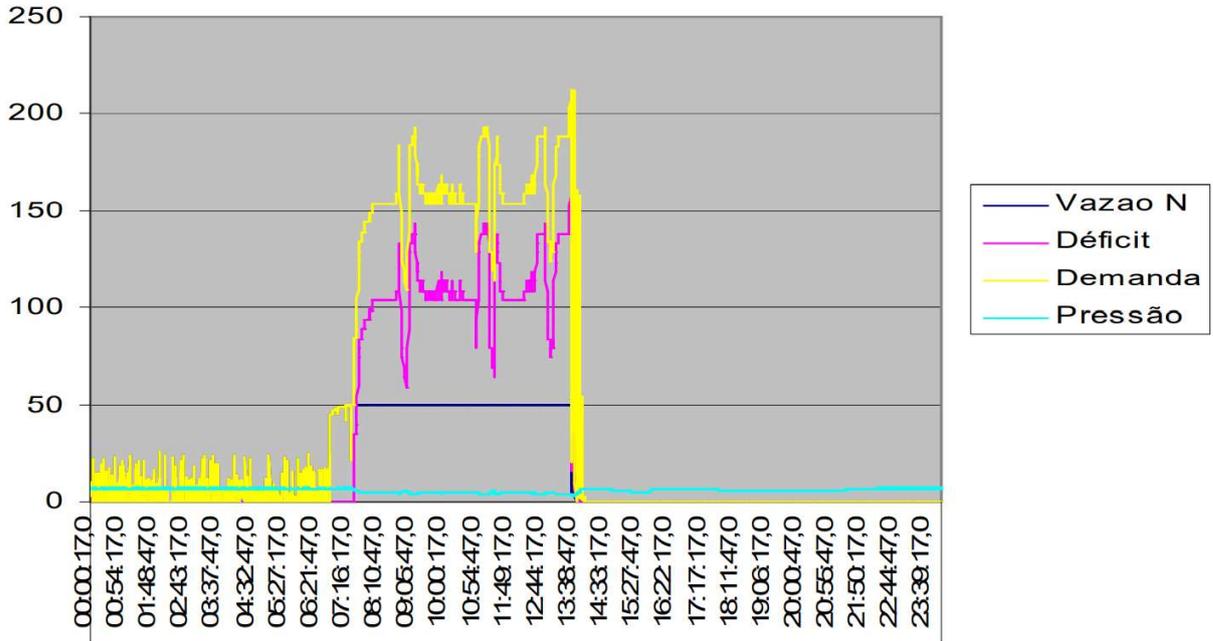
Figura 50 - Medição de Potência do ZR 5 (2º dia)



Fonte: autor

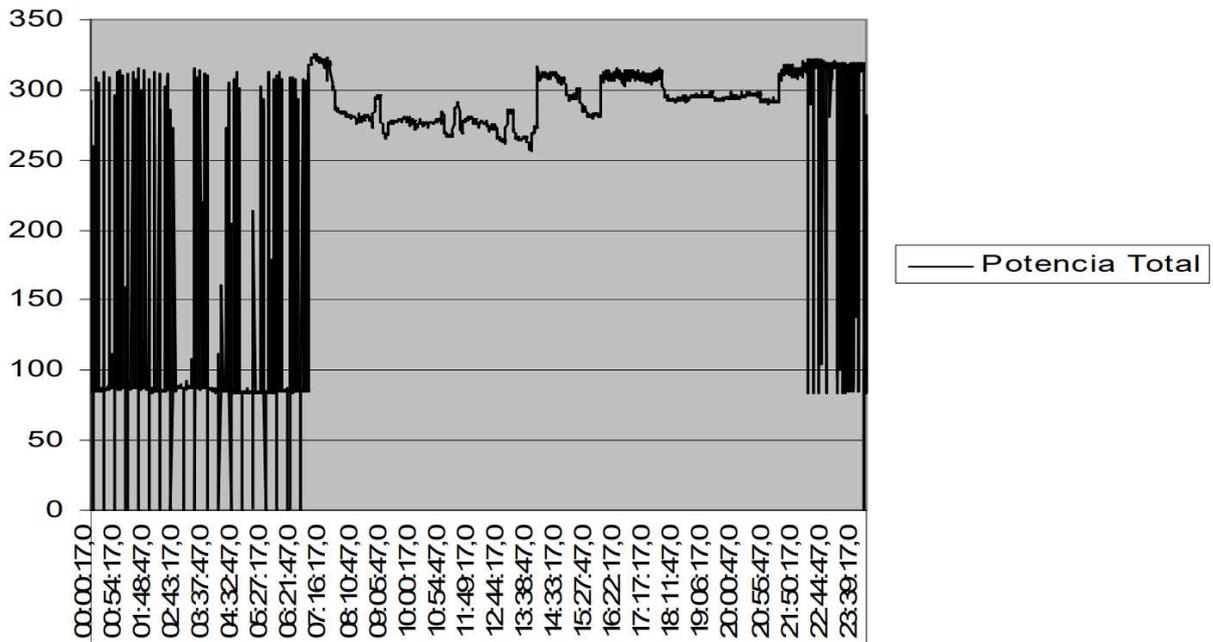
ANEXO C – Gráficos da Geração de Ar Comprimido Compressor ZR 5 (continuação)

Figura 51 - Medição da Pressão e Vazão do ZR 5 (3º dia)



Fonte: autor

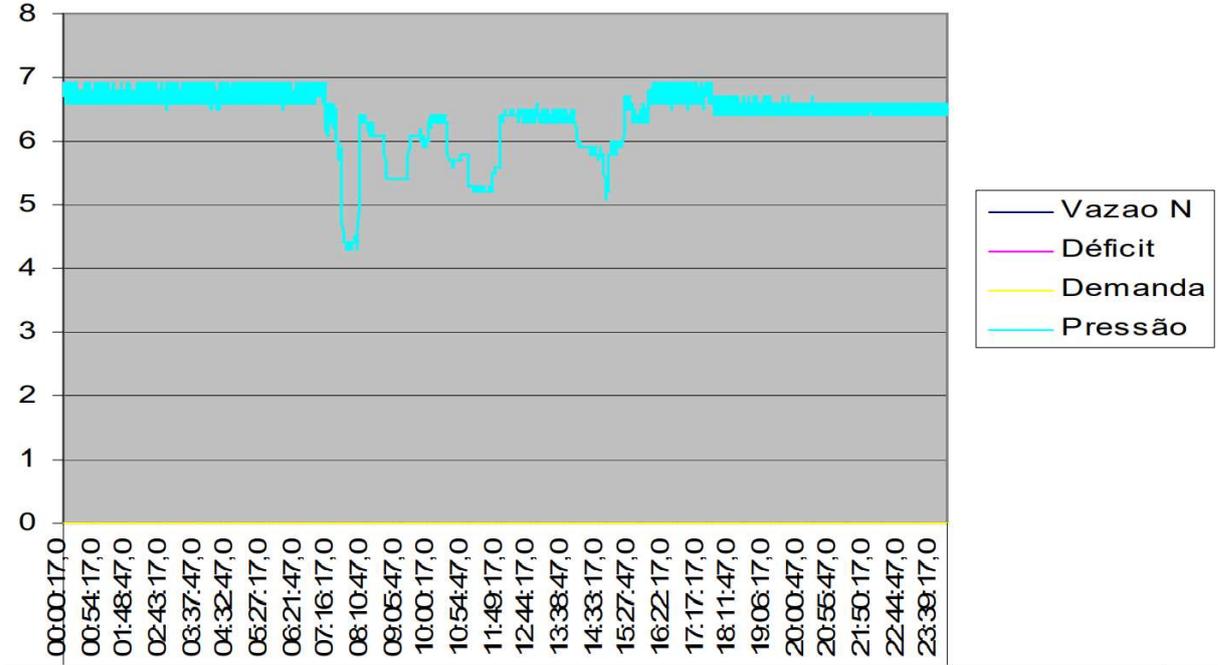
Figura 52 - Medição de Potência do ZR 5 (3º dia)



Fonte: autor

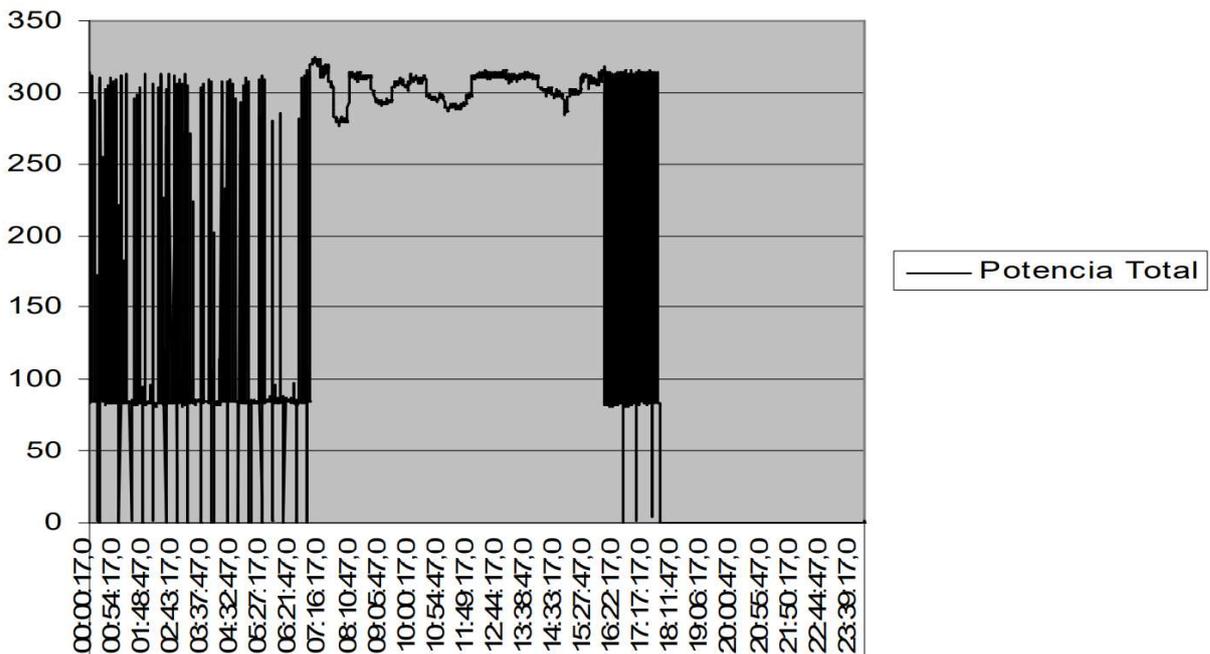
ANEXO C – Gráficos da Geração de Ar Comprimido Compressor ZR 5 (continuação)

Figura 53 - Medição da Pressão e Vazão do ZR 5 (4º dia)



Fonte: autor

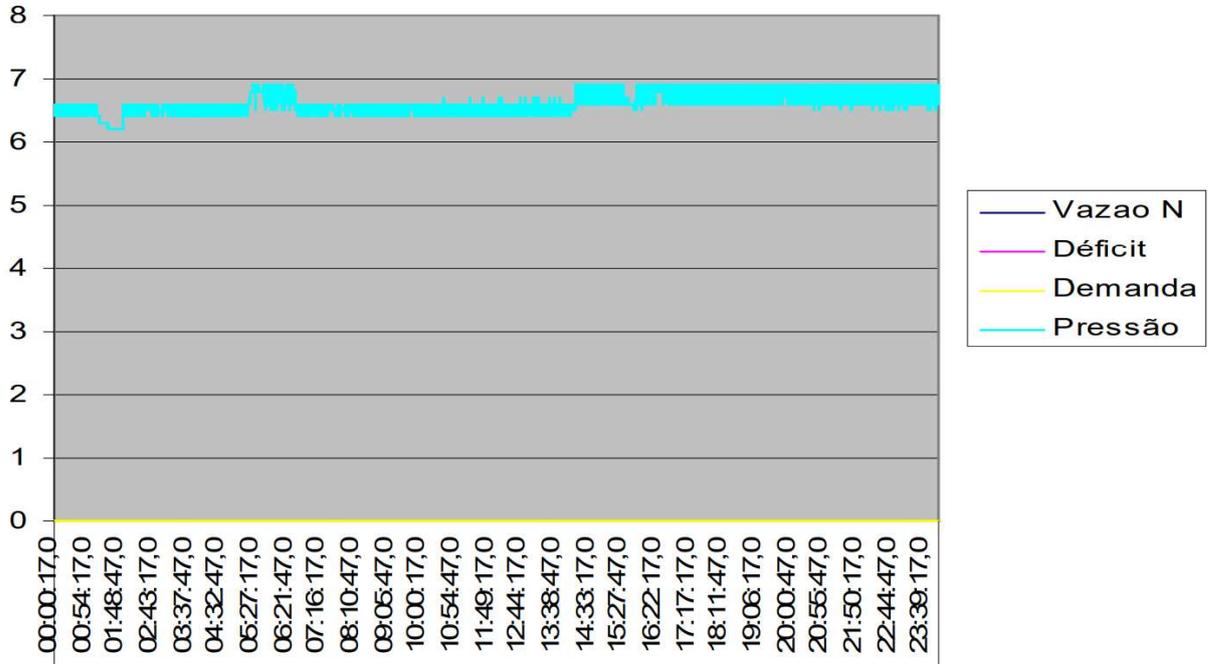
Figura 54 - Medição de Potência do ZR 5 (4º dia)



Fonte: autor

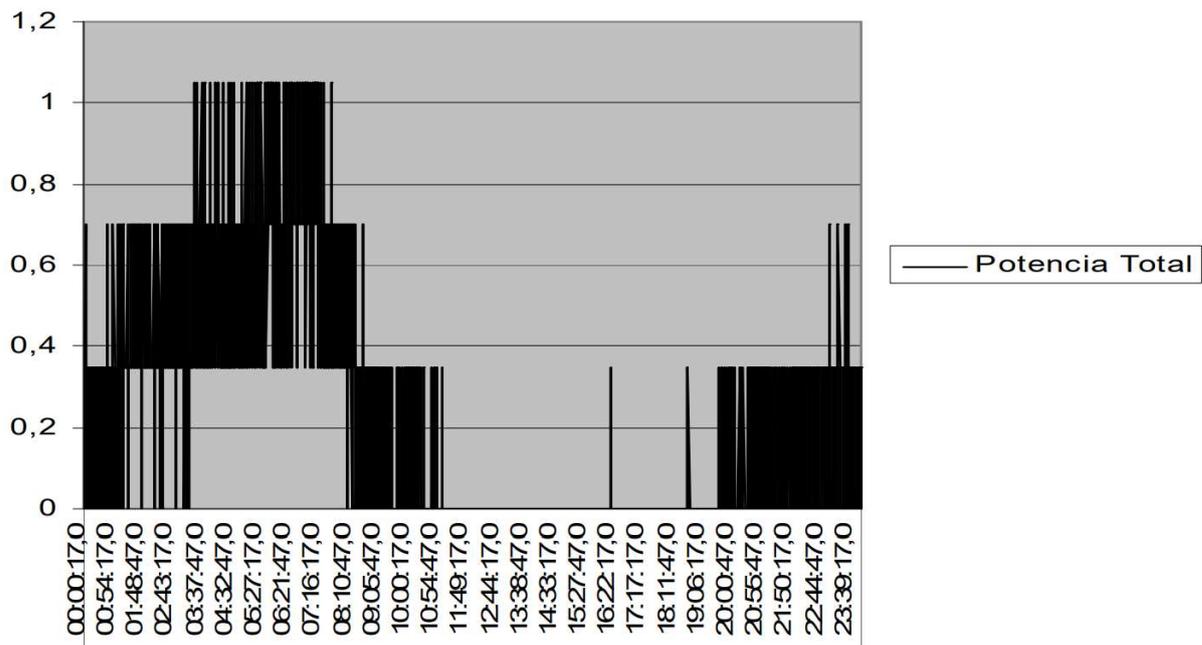
ANEXO C – Gráficos da Geração de Ar Comprimido Compressor ZR 5 (continuação)

Figura 55 - Medição da Pressão e Vazão do ZR 5 (5º dia)



Fonte: autor

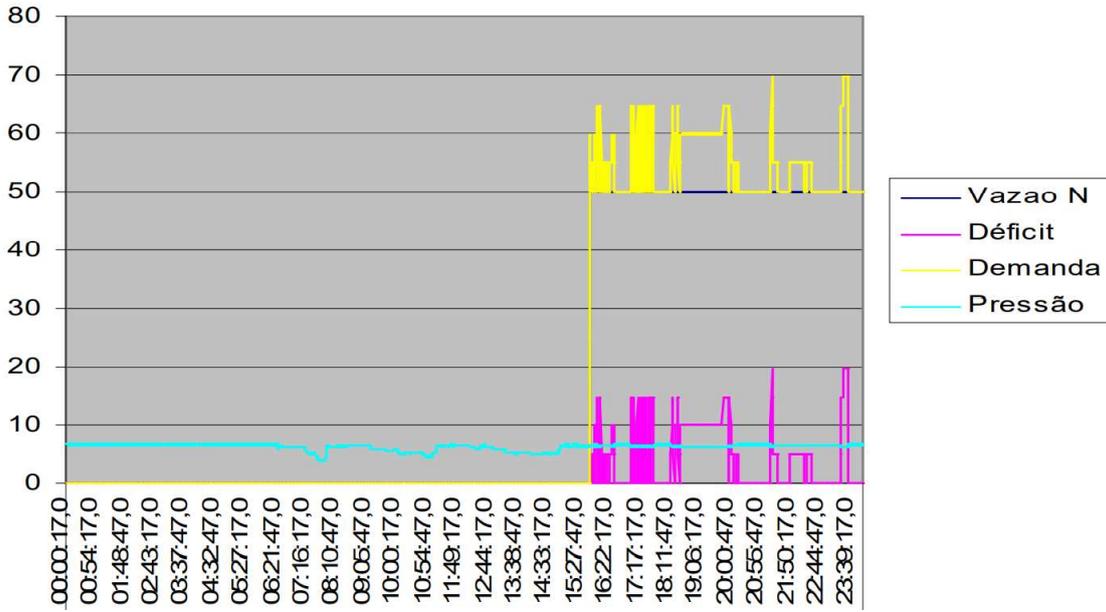
Figura 56 - Medição de Potência do ZR 5 (5º dia)



Fonte: autor

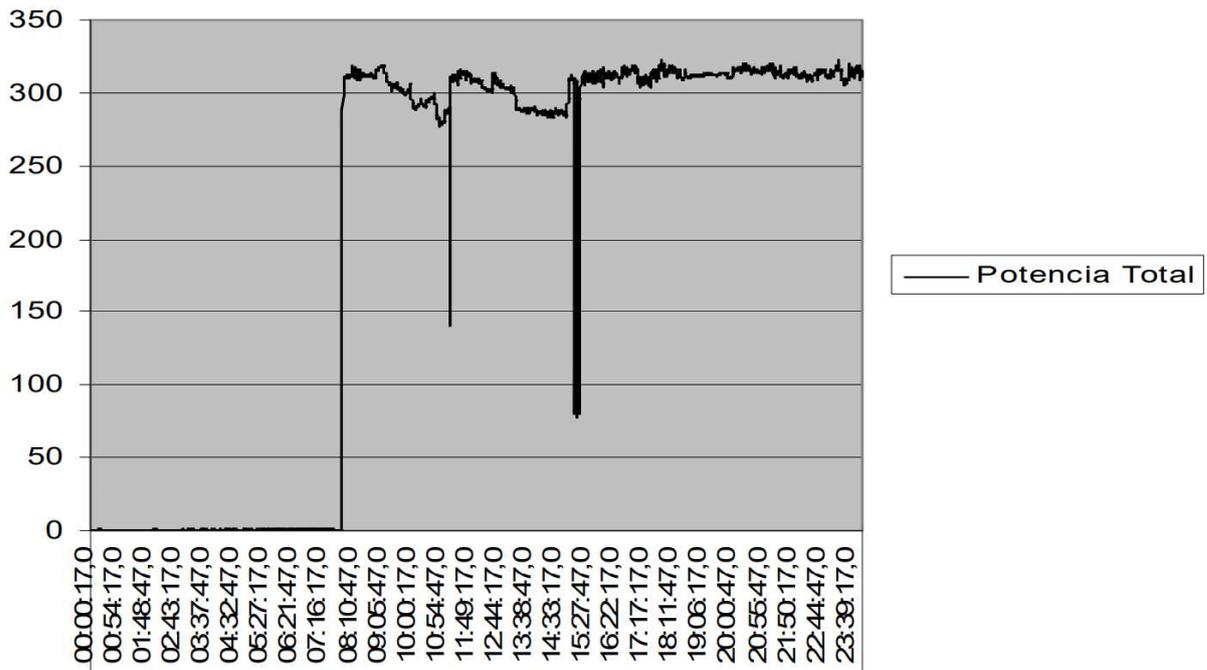
ANEXO C – Gráficos da Geração de Ar Comprimido Compressor ZR 5 (continuação)

Figura 57 - Medição da Pressão e Vazão do ZR 5 (6º dia)



Fonte: autor

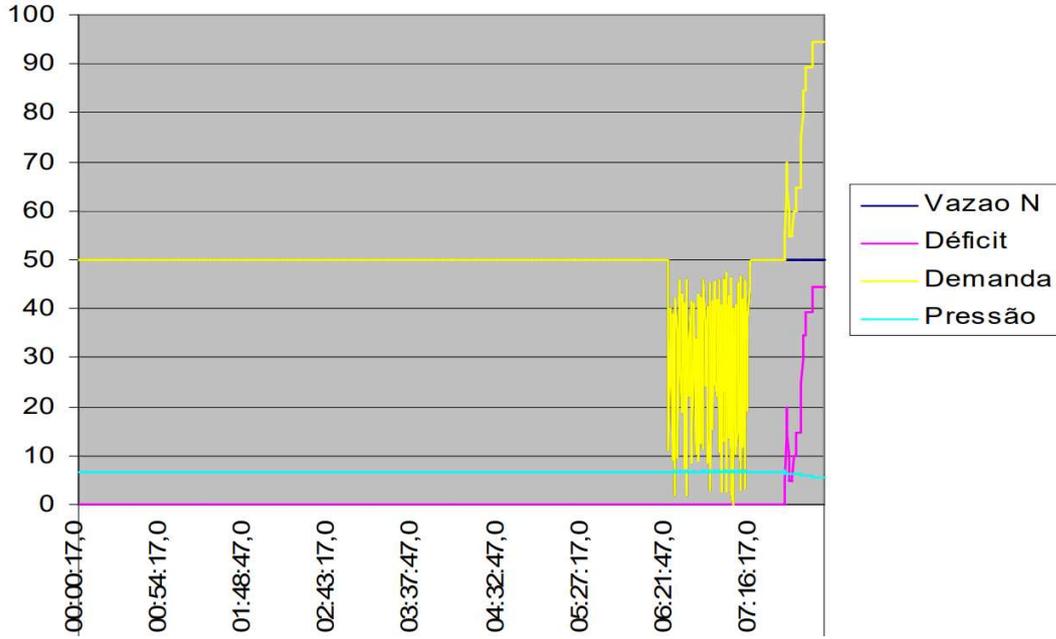
Figura 58 - Medição de Potência do ZR 5 (6º dia)



Fonte: autor

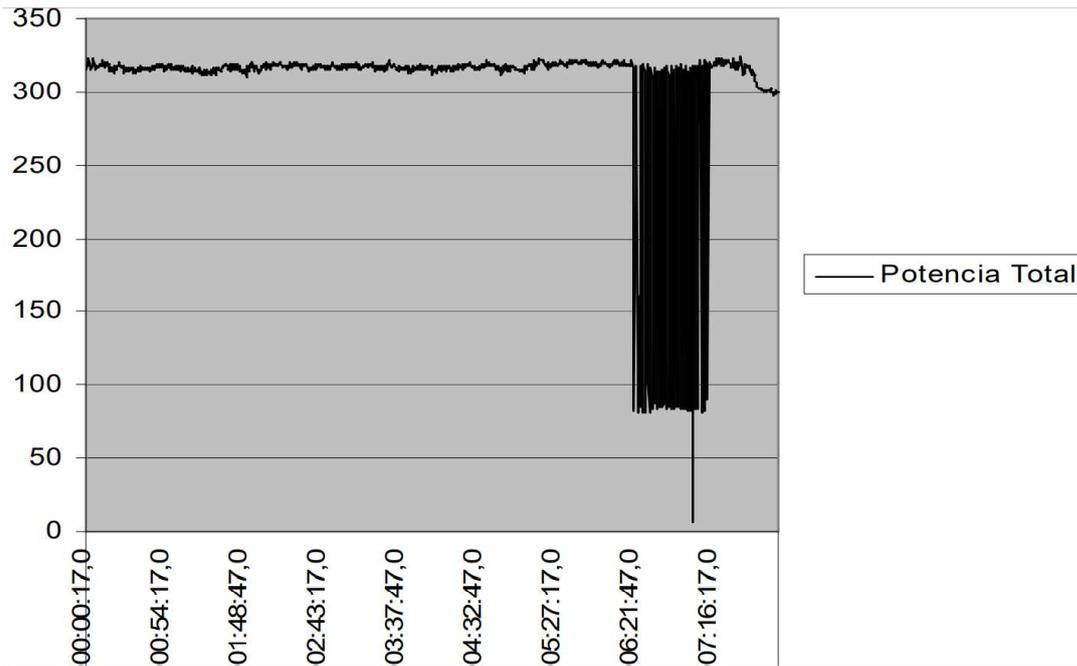
ANEXO C – Gráficos da Geração de Ar Comprimido Compressor ZR 5 (continuação)

Figura 59 - Medição da Pressão e Vazão do ZR 5 (7º dia)



Fonte: autor

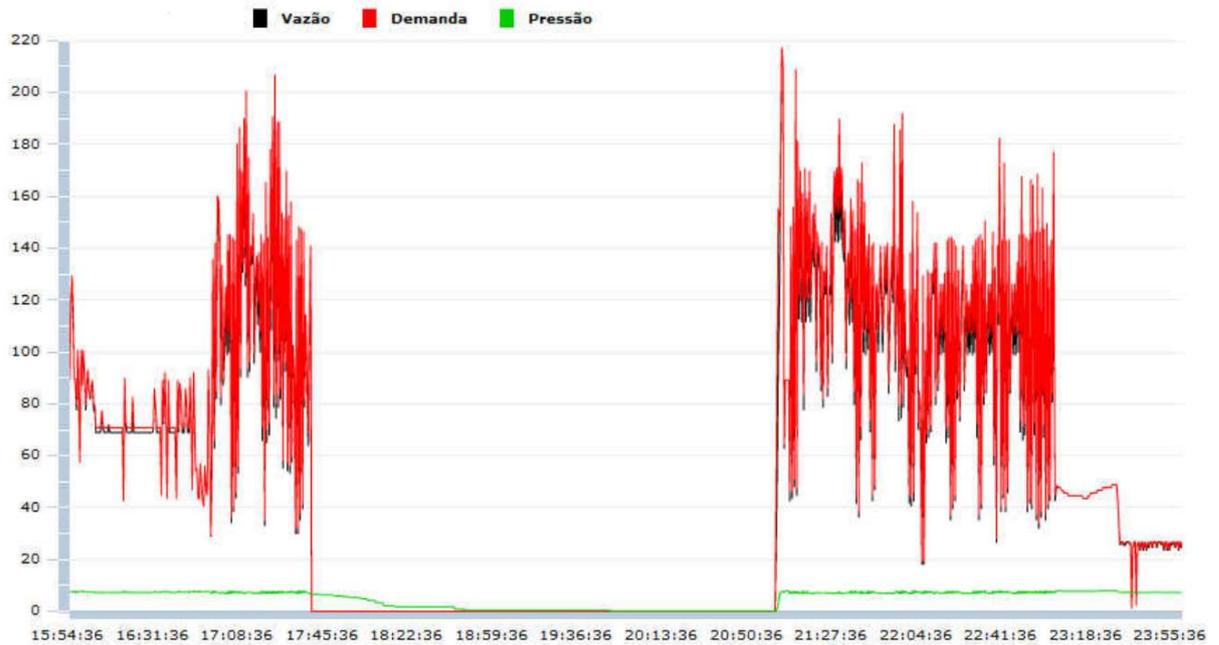
Figura 60 - Medição de Potência do ZR 5 (7º dia)



Fonte: autor

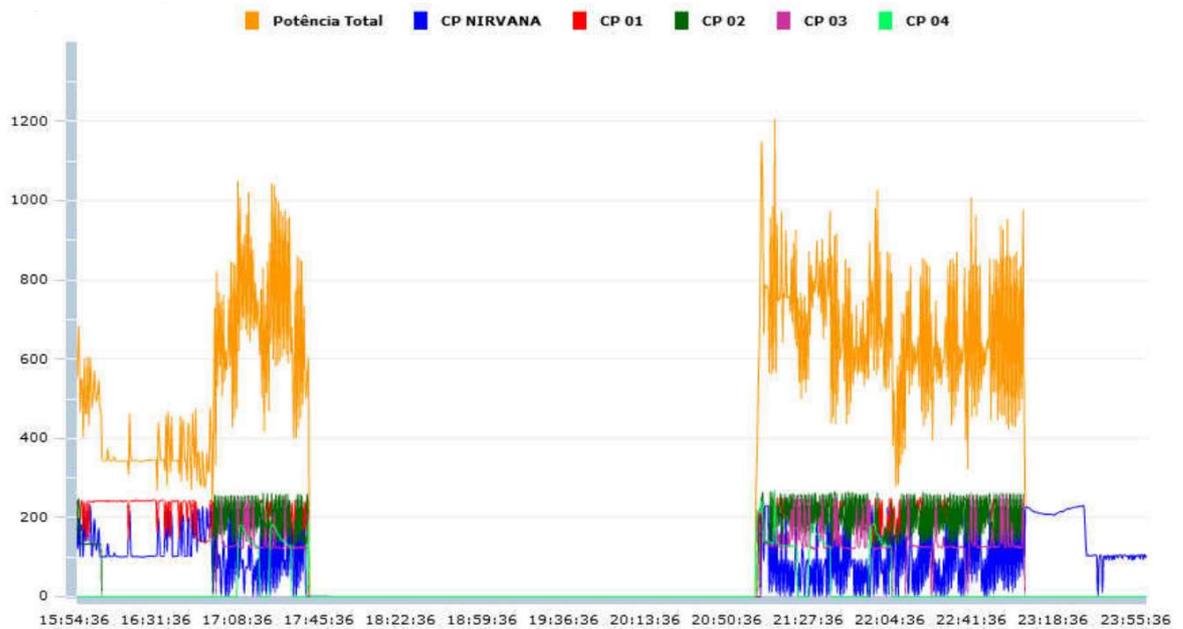
ANEXO D – Gráficos da Geração da Nova Central de Ar Comprimido

Figura 61 - Medição da Pressão e Vazão da Nova Central (1º dia)



Fonte: autor

Figura 62 - Medição de Potência da Nova Central (1º dia)



Fonte: autor

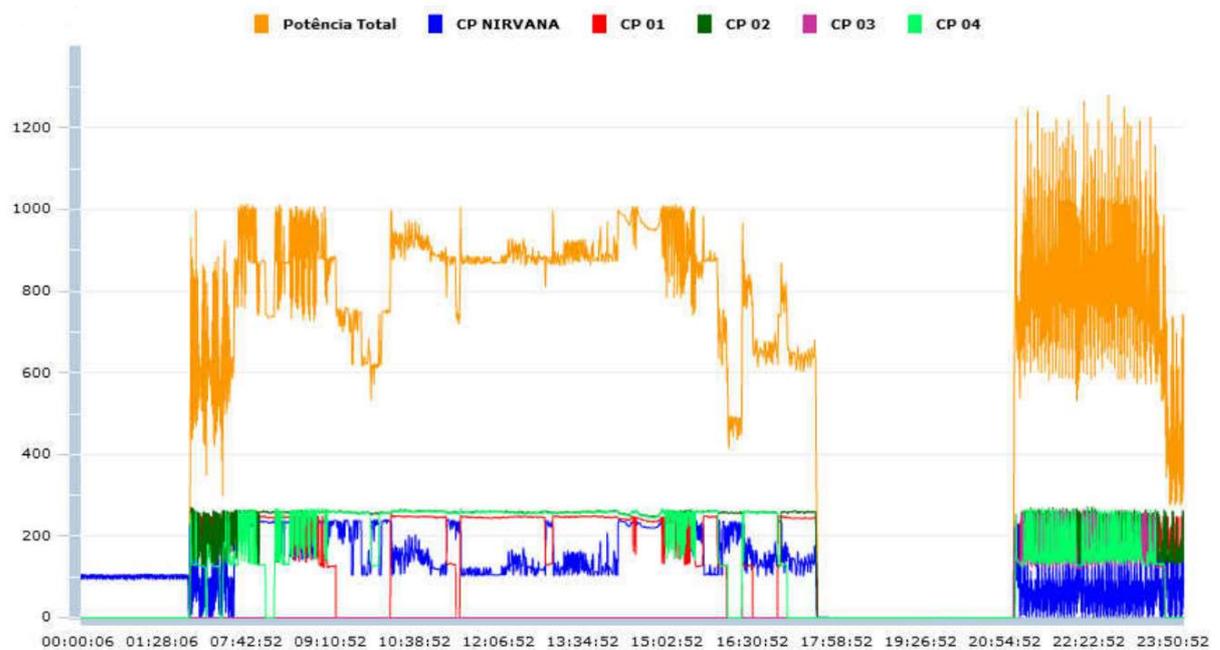
ANEXO D – Gráficos da Geração da Nova Central de Ar Comprimado (continuação)

Figura 63 - Medição da Pressão e Vazão da Nova Central (2º dia)



Fonte: autor

Figura 64 - Medição de Potência da Nova Central (2º dia)



Fonte: autor

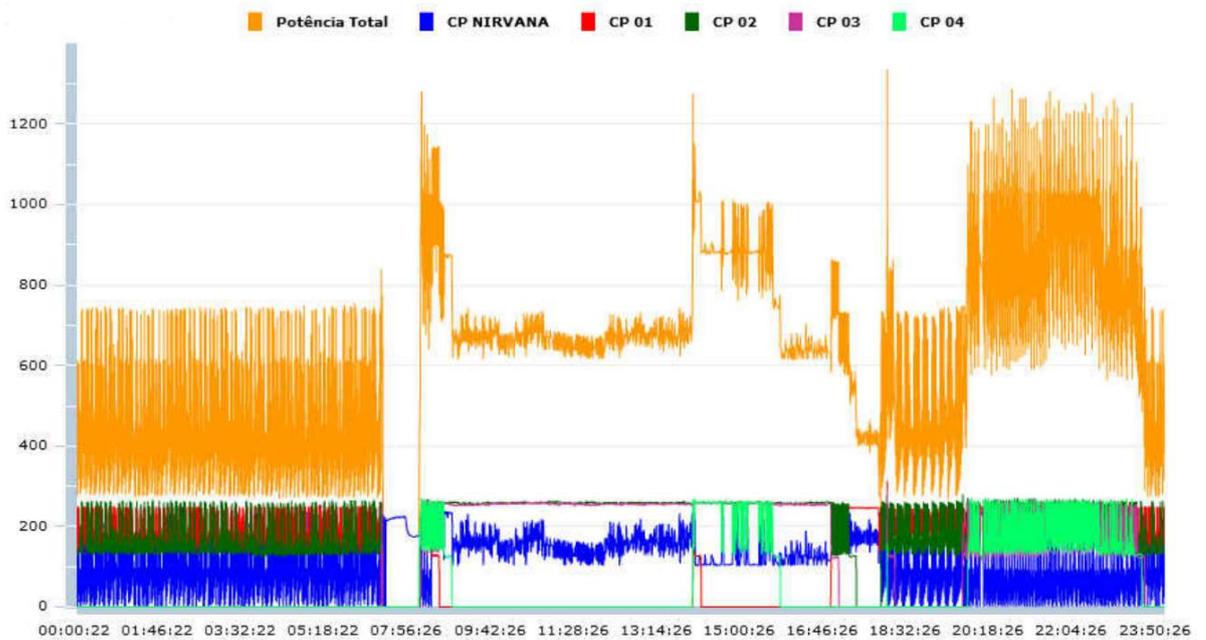
ANEXO D – Gráficos da Geração da Nova Central de Ar Comprimido (continuação)

Figura 65 - Medição da Pressão e Vazão da Nova Central (3º dia)



Fonte: autor

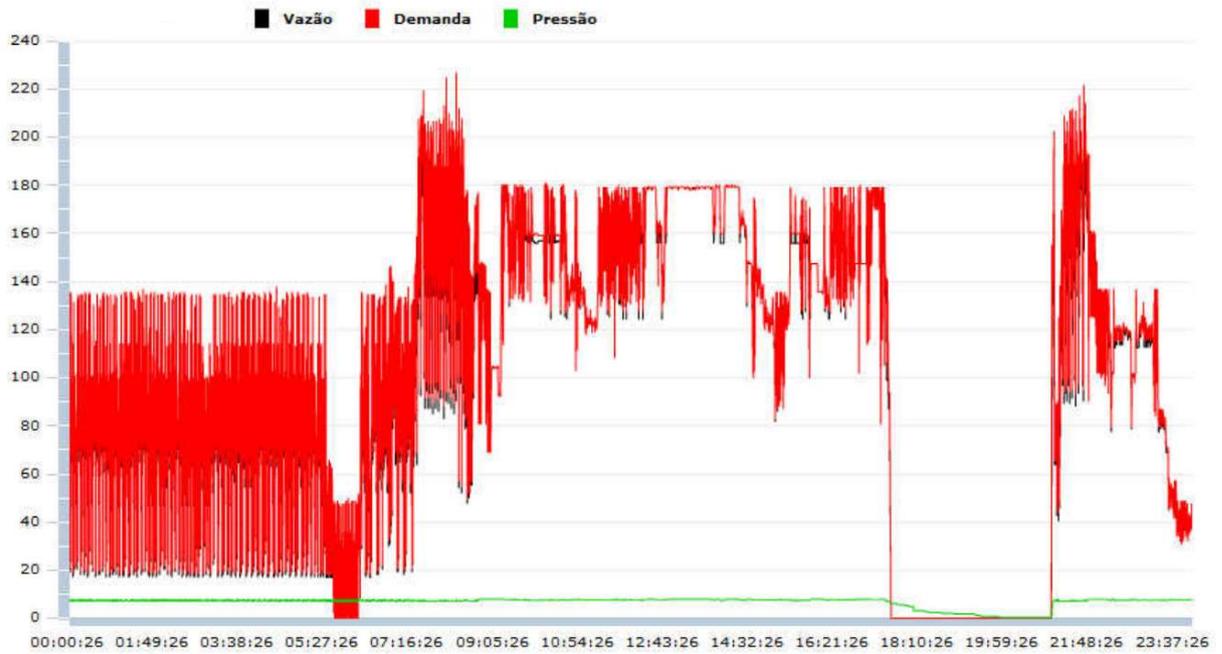
Figura 66 - Medição de Potência da Nova Central (3º dia)



Fonte: autor

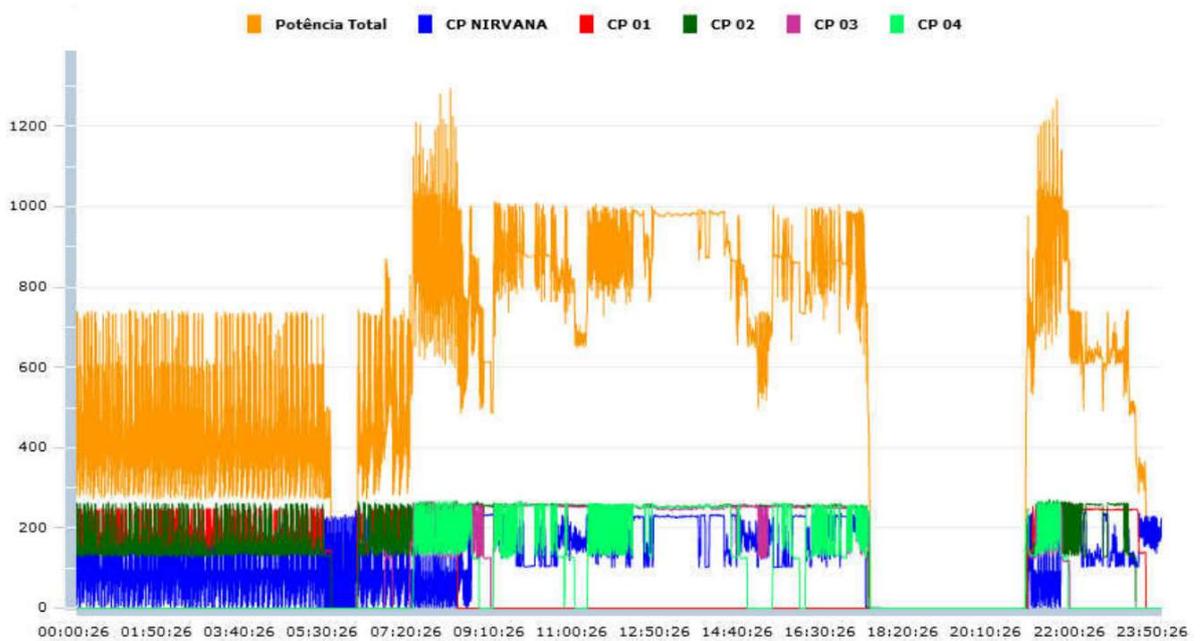
ANEXO D – Gráficos da Geração da Nova Central de Ar Comprimido (continuação)

Figura 67 - Medição da Pressão e Vazão da Nova Central (4º dia)



Fonte: autor

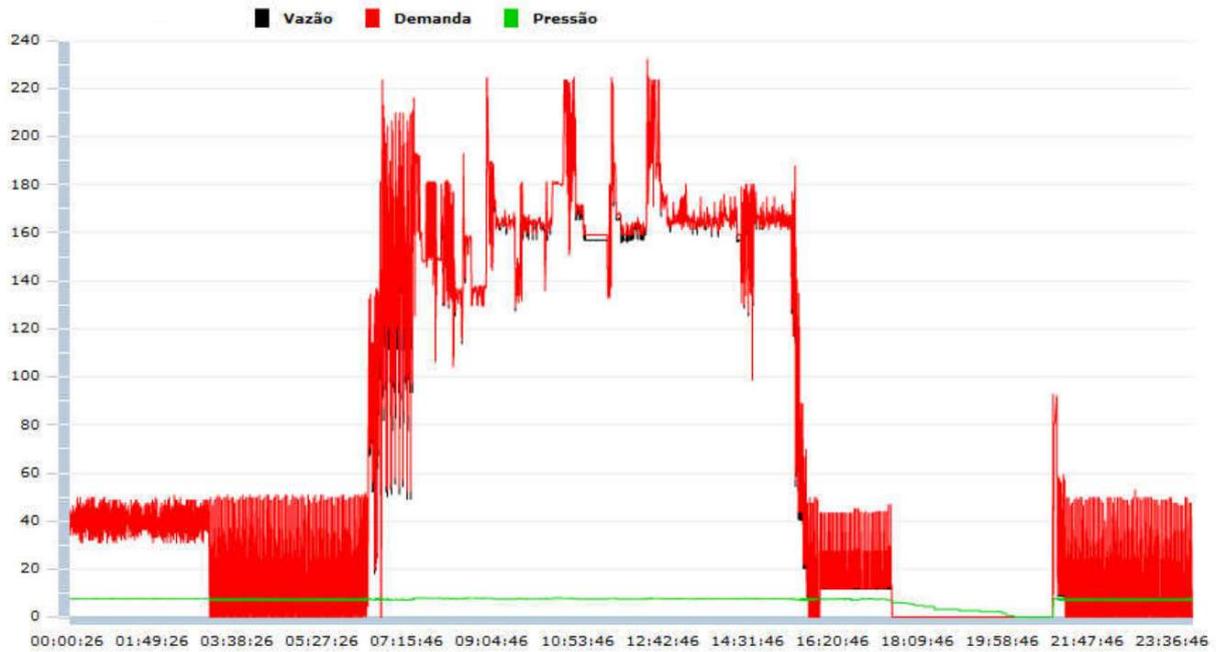
Figura 68 - Medição de Potência da Nova Central (4º dia)



Fonte: autor

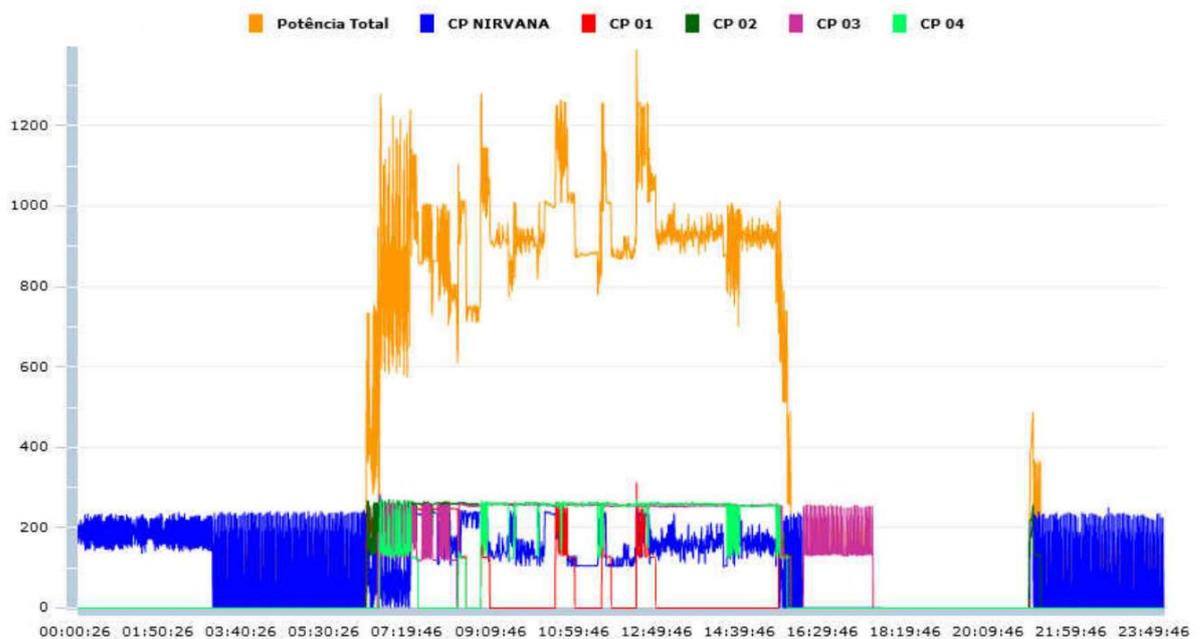
ANEXO D – Gráficos da Geração da Nova Central de Ar Comprimido (continuação)

Figura 69 - Medição da Pressão e Vazão da Nova Central (5º dia)



Fonte: autor

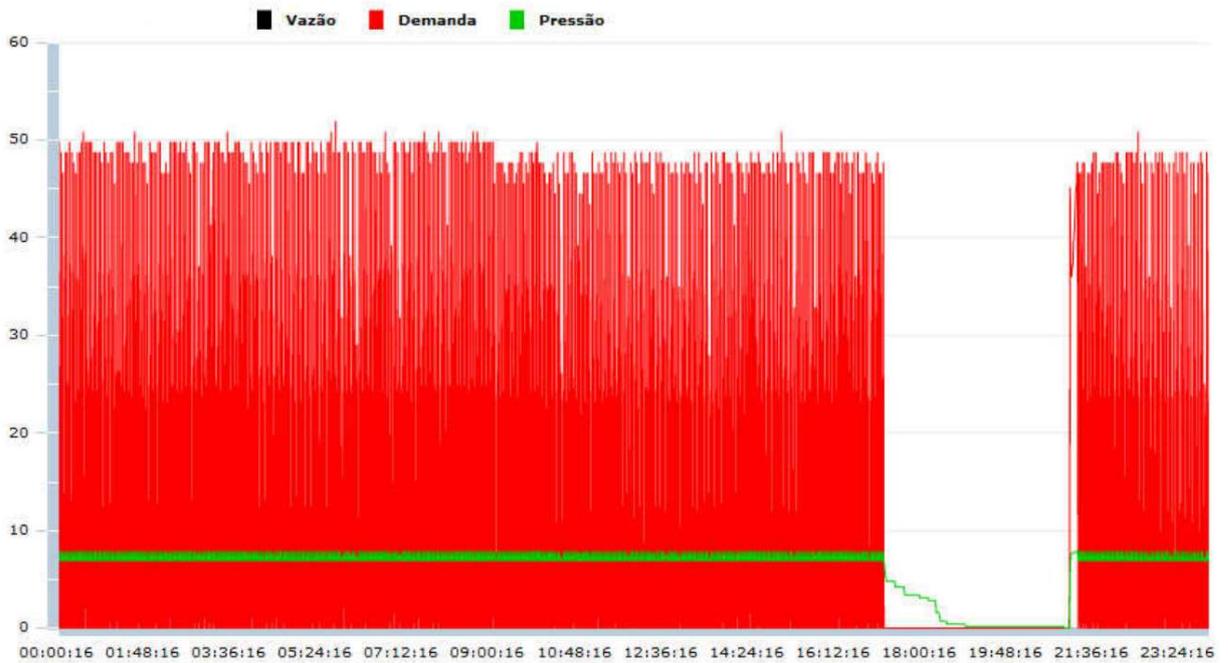
Figura 70 - Medição de Potência da Nova Central (5º dia)



Fonte: autor

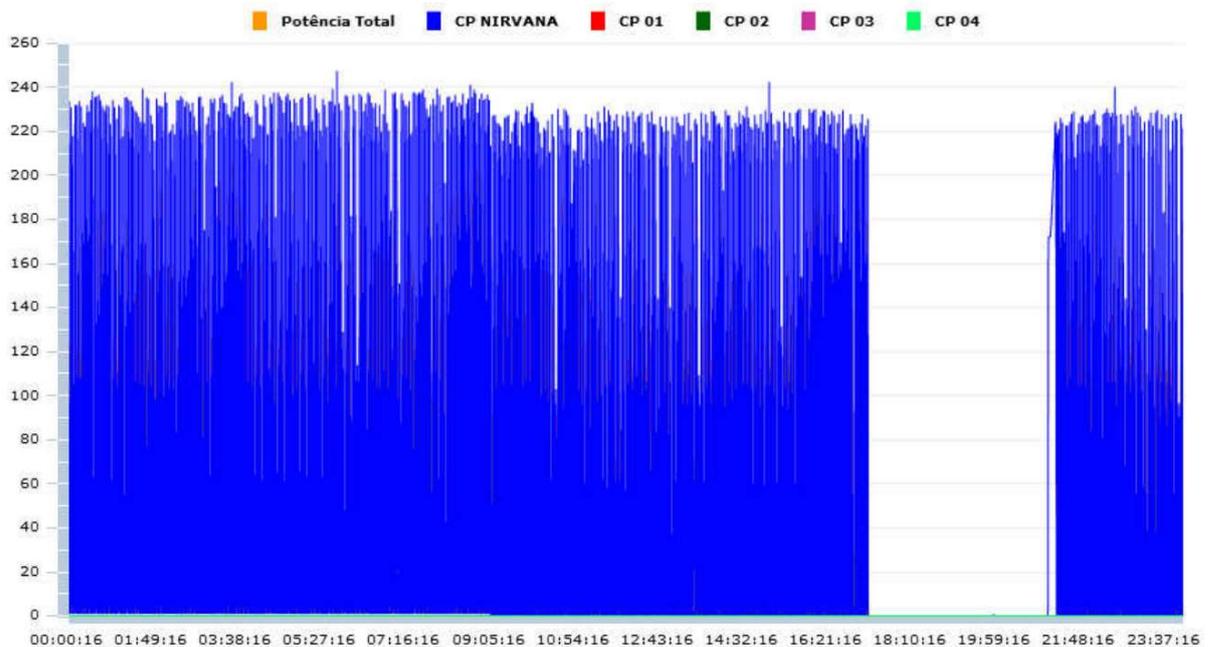
ANEXO D – Gráficos da Geração da Nova Central de Ar Comprimido (continuação)

Figura 71 - Medição da Pressão e Vazão da Nova Central (6º dia)



Fonte: autor

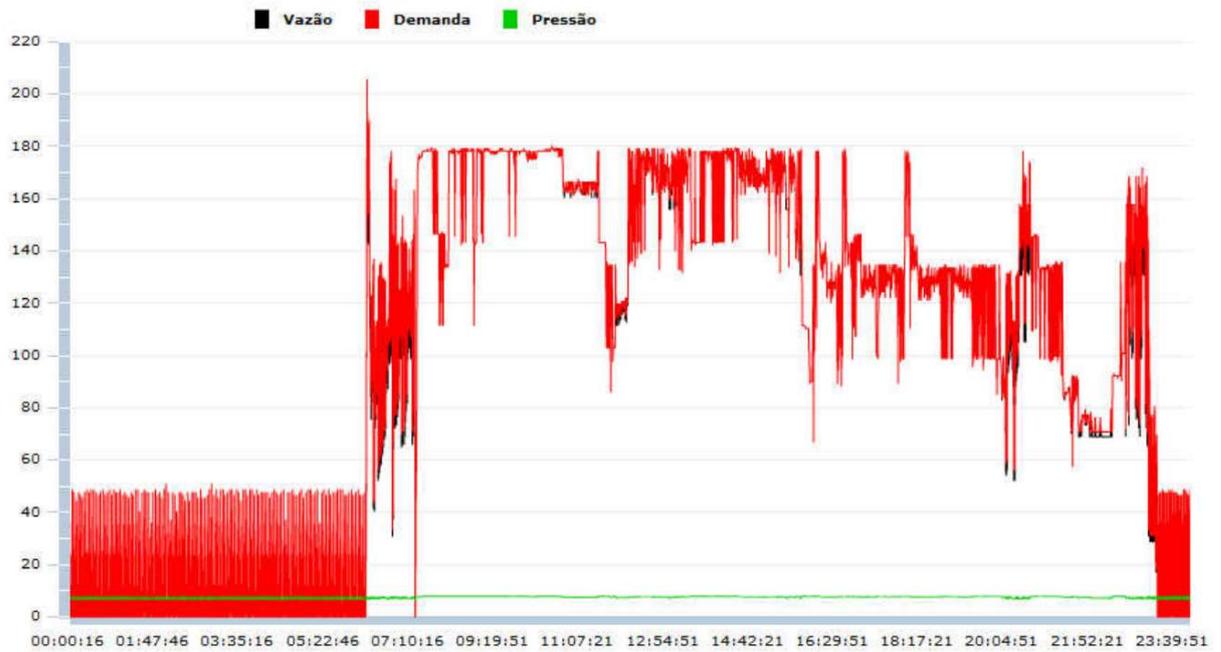
Figura 72 - Medição de Potência da Nova Central (6º dia)



Fonte: autor

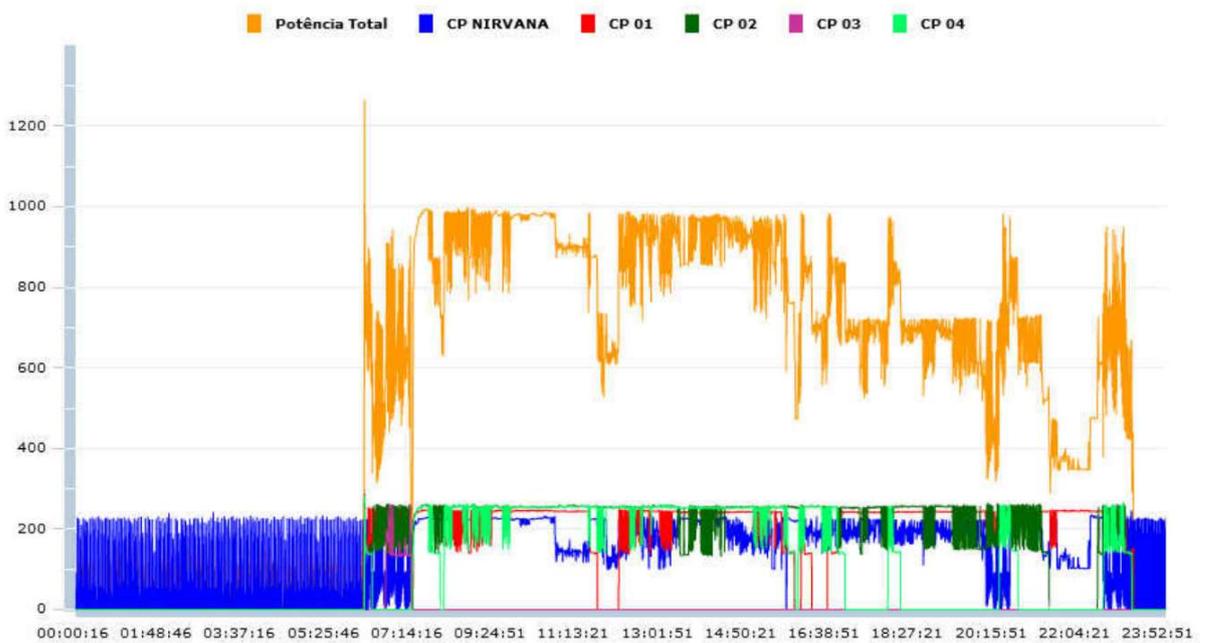
ANEXO D – Gráficos da Geração da Nova Central de Ar Comprimido (continuação)

Figura 73 - Medição da Pressão e Vazão da Nova Central (7º dia)



Fonte: autor

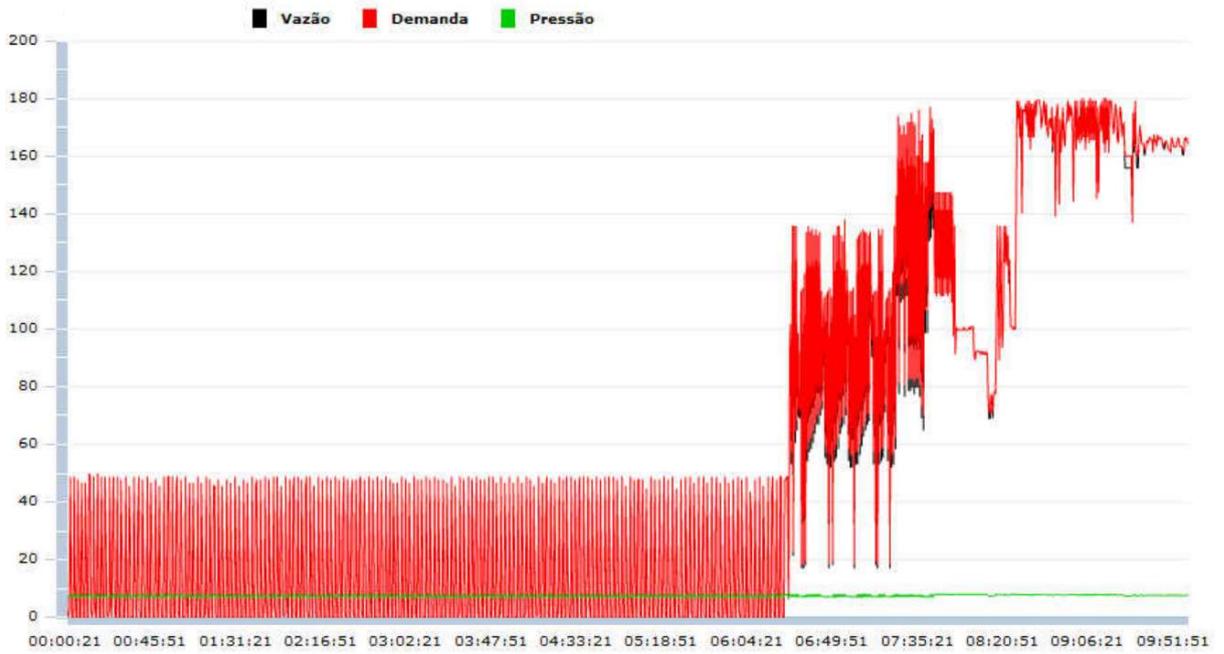
Figura 74 - Medição de Potência da Nova Central (7º dia)



Fonte: autor

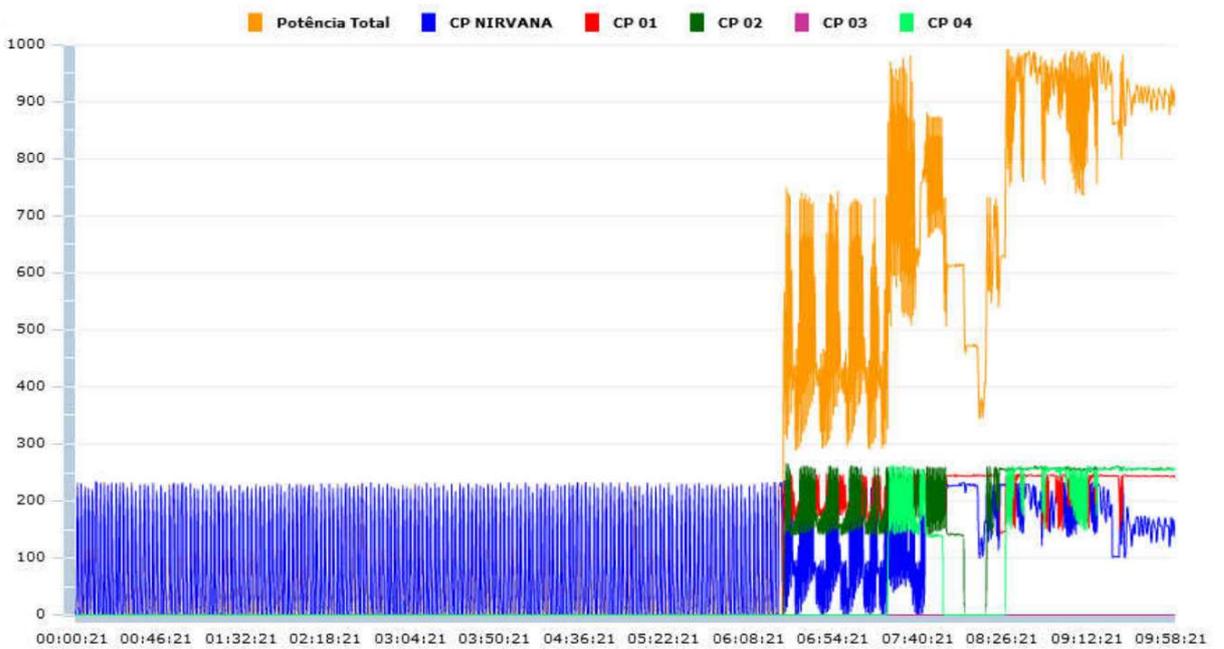
ANEXO D – Gráficos da Geração da Nova Central de Ar Comprimido (continuação)

Figura 75 - Medição da Pressão e Vazão da Nova Central (8º dia)



Fonte: autor

Figura 76 - Medição de Potência da Nova Central (8º dia)



Fonte: autor

ANEXO E – Tabela-resumo de dados

Tabela 15 – Resumo da antiga e nova central

Equipamentos	Característica Nominais			Características de Medição			Custo		
	Vazão Nominal [m ³ /h]	Potência Nominal [kW]	Potência Específica Nominal [kW/m ³]	Vazão Máxima Lida [m ³ /h]	Vazão Média Corrigida [m ³ /h]	Potência Específica Média Lida [kW/m ³]	Valor do kWh [R\$/kWh]	Custo de Operação por hora [R\$/kWh]	Custo de operação anual (8.000 h) [R\$]
Central Principal	7638	975	0,1276	5702	3030	0,1411	0,23	98,33	786.640,00
ZR 275	2700	262,5	0,0972	2553	1488	0,1407	0,23	48,15	385.200,00
ZR 5	3564	375	0,1052	3389	2040	0,1411	0,23	66,20	529.600,00
Total	13902	1612,5	0,1159	11644	6558	0,1409	0,23	212,52	1.700.200,85
Nova Central	12540	1125	0,0897	14.119,2	4.735,2	0,0938	0,23	102,16	817.257,64

Fonte: autor