

PRÊMIO GLP DE INOVAÇÃO E TECNOLOGIA – 2020

Otimização do sistema de ar comprimido - Geração e Consumo



Categoria: Meio Ambiente

- Nicolas Gheno Karacristo – Liquigás

**BARUERI – SP
SETEMBRO-2020**

SUMÁRIO

1	BREVE HISTÓRICO DA EMPRESA	3
2	RESUMO.....	6
3	PROBLEMAS E OPORTUNIDADES.....	7
4	OBJETIVOS.....	9
5	MATERIAIS E MÉTODOS	10
5.1	EQUIPAMENTOS	10
5.2	CENÁRIO ANALISADO.....	12
5.3	ANÁLISE ESTATÍSTICA	13
5.4	ALTERAÇÃO DA BANDA DE PRESSÃO DE TRABALHO E CASCATEAMENTO	15
5.5	TEMPORIZAÇÃO.....	16
5.6	ÍNDICE DE VAZAMENTOS DA REDE.....	17
5.7	MAPEAMENTO DOS VAZAMENTOS.....	18
6	CRONOGRAMA	19
7	RESULTADOS.....	20
7.1	RESULTADOS CICLO DIURNO (7:30~17:30).....	20
7.2	RESULTADOS CICLO NOTURNO (17:30~7:30).....	21
7.3	CÁLCULO PERCENTUAL DE VAZAMENTOS.....	23
7.4	MAPEAMENTO DOS VAZAMENTOS.....	24
8	CÁLCULO ESTIMADO DE CUSTO DOS VAZAMENTOS.....	25
9	CÁLCULO ESTIMADO DE ECONOMIA	26
9.1	ECONOMIA CICLO DIURNO	26
9.1.1	Economia energética ciclo diurno.....	26
9.1.2	Economia com manutenção do equipamento ciclo diurno	27
9.2	ECONOMIA CICLO NOTURNO.....	27
9.2.1	Economia energética ciclo noturno	27
9.2.2	Economia com manutenção do equipamento ciclo noturno	28
9.3	ECONOMIA ANUAL TOTAL ESTIMADA	28
10	CONCLUSÕES	29
11	OPORTUNIDADES DE MELHORIA.....	30
12	RESPONSÁVEL PELO PROJETO DENTRO DA LIQUIGÁS.....	31
13	REFERÊNCIAS.....	32

1 BREVE HISTÓRICO DA EMPRESA

LIQUIGÁS

A história da Liquigás começou na Itália, pouco antes da Segunda Guerra Mundial. Foi uma das pioneiras na exploração comercial do Gás Liquefeito de Petróleo – GLP, para o uso doméstico.

A ideia inicial da Liquigás era a criação de companhias regionais, com a participação de sócios brasileiros. Em 1954, em São Paulo, foi constituída a Liquigás do Brasil.

Na década de 70, a crise mundial do petróleo que afetava os países cancelou grandes investimentos e gerou modificações estruturais. A Liquigás do Brasil adquiriu a Heliogás do grupo Motecatini.

Em 1981, a Agip Petroli - multinacional italiana pertencente ao Grupo ENI (Ente Nazionale Idrocarburi) comprou a Liquigás do Brasil, transformando-a em AgipLiquigás.

Em 1984, em sociedade com outra distribuidora de GLP, a AgipLiquigás, constituiu a Novogás – Cia Nordestina de Gás, atuando no nordeste do país.

Em 1990, a Novogás expandiu sua área de atuação, adquirindo a Tropigás, que já atuava no norte do país.

A partir de 1997, a AgipLiquigás passou a ser a única acionista, assumindo o controle efetivo das duas marcas: Novogás e Tropigás.

Em dezembro de 2000, a AgipLiquigás mudou sua denominação social para Agip do Brasil S.A.

Em agosto de 2004, a Petrobras Distribuidora S.A – BR, subsidiária integral da empresa Petróleo Brasileiro S.A. - Petrobras, oficializou a compra da Agip do Brasil S.A., que passou a utilizar provisoriamente a denominação social de Sophia do Brasil S.A.

A partir de 1º de janeiro de 2005, a empresa começou a atuar no mercado como Liquigás Distribuidora S.A.

Em novembro de 2012, após uma reorganização societária, passou a ser subsidiária direta da Petrobras S.A.

Está presente em 23 estados brasileiros (exceto Amazonas, Acre e Roraima), representando uma ampla cobertura nacional.

Conta com uma força de trabalho de cerca de 3.200 empregados próprios, distribuídos em seus 23 Centros Operativos, 17 Depósitos, 01 Base de Armazenagem e Carregamento Rodoferroviário, 01 Base de armazenagem granel, 05 unidades de envasamento em terceiros e 02 Depósitos através de Operadores Logísticos, uma rede com aproximadamente 4.800 revendedores autorizados na comercialização de GLP envasado, 35.000 clientes de medição individualizada e cerca de 20.000 clientes dos demais segmentos do GLP granel.



Unidades Operacionais da Liquigás

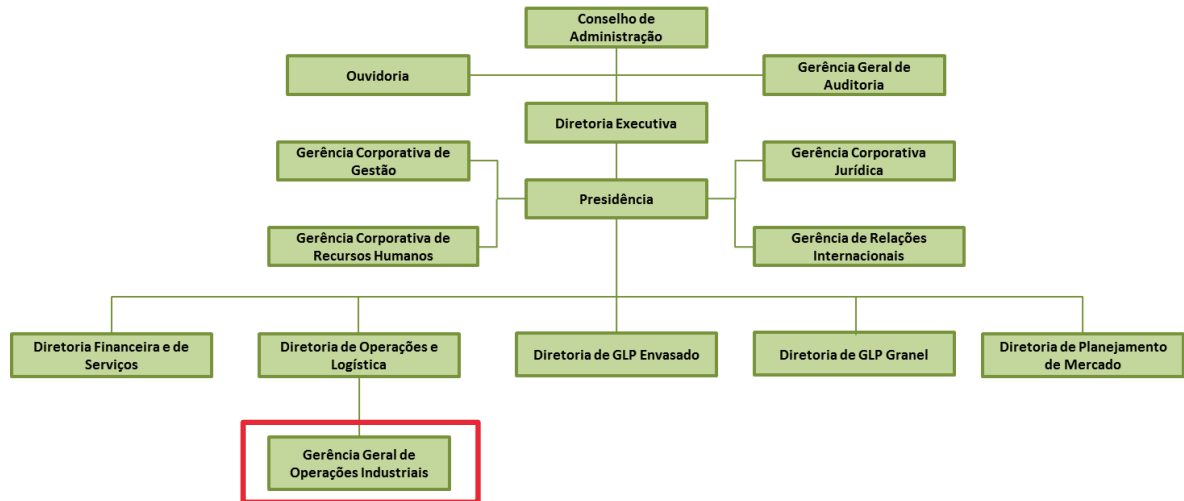
Atende mensalmente mais de 35 milhões de consumidores residenciais, com soluções que abrangem desde variados tamanhos de embalagens, como os botijões de 2, 5, 8, 9 e 13 kg, para o gás de uso doméstico (Área de GLP Envasado) até o fornecimento de produtos e serviços sob medida aos mais diversos setores da indústria, comércio, agricultura, pecuária, aviários, condomínios, hotéis, entre outros (Área de GLP Granel).



Produtos Comercializados pela Liquigás

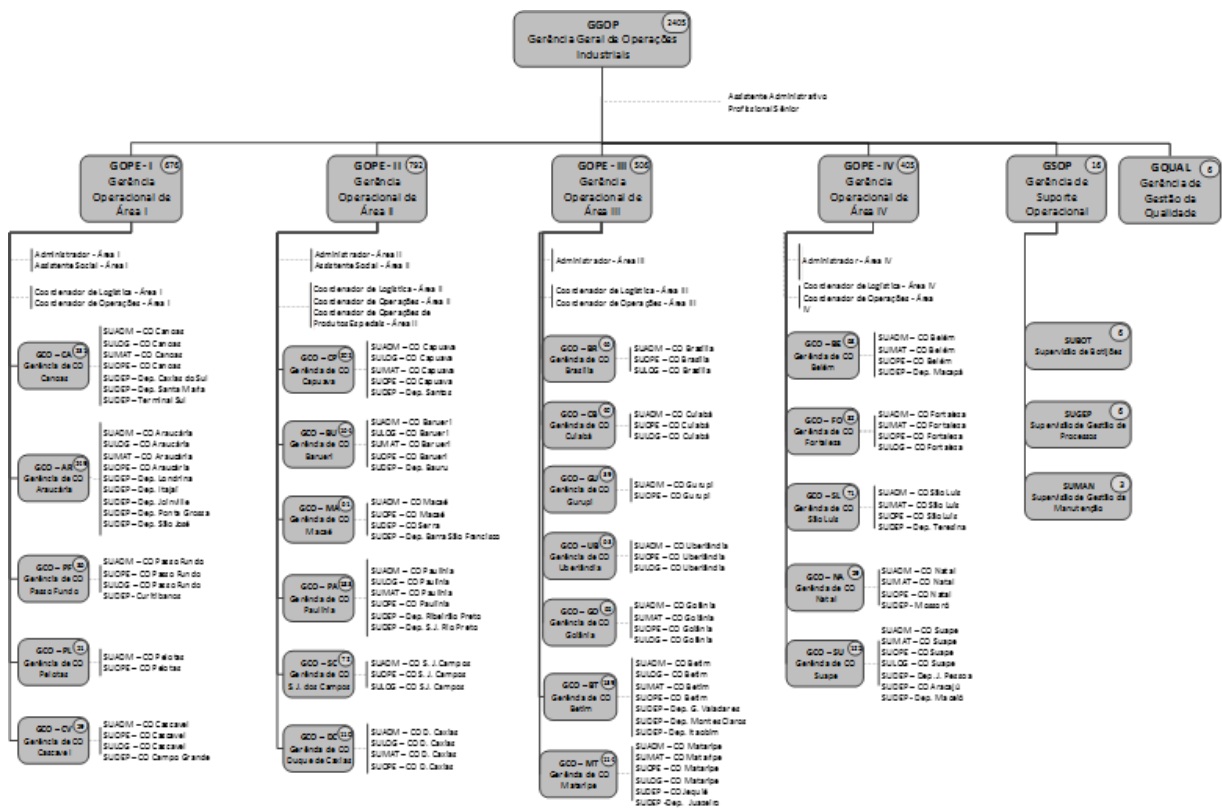


Centro Operativo Liquigás (Unidade Operacional)



Estrutura da Liquigás com destaque para a Gerência Geral de Operações Industriais.

Estrutura da Gerência Geral de Operações Industriais.



2 RESUMO

Otimização do sistema de ar comprimido - Geração e Consumo

Objetivo: Examinar sistematicamente a geração e consumo do sistema de ar comprimido do Centro Operativo de Barueri e propor medidas para diminuir o consumo energético. **Material e Método:** O centro operativo de Barueri dispõe de 3 Compressores Atlas Copco GA75+ 125 FF dotados de motores de 75kW controlados por central Elektronikon Mk5 capazes de gerarem 780m³/h de ar comprimido cada um. Além disso são 20 reservatórios de ar comprimido e uma complexa rede de dispositivos consumidores (válvulas, atuadores, cilindros, motores pneumáticos, etc). Foi feito o levantamento estatístico de funcionamento dos compressores utilizando-se dos registradores de horas em cada central de controle. A partir da base de dados de referência, foram feitas mudanças nas bandas de trabalho dos compressores e coletados novos dados para comparação. O funcionamento dos compressores foi temporizado de acordo com a demanda de produção do CO. Foi feito também a cronometragem dos tempos de carga e alívio para cálculo do índice percentual de vazamentos, com as operações do CO paralisadas e com a rede pressurizada, além do mapeamento dos principais pontos de vazamento. **Resultados:** Com as mudanças propostas os compressores passaram de 13% para 40% do tempo que permanecem desligados durante o dia e de 7% para 85% durante a noite. Além disso, o número de partidas do motor diminuiu mais de 50% assim como o número de ciclos carga e alívio. Com isto há a estimativa de uma economia anual da ordem de **236,84 MWh** de energia elétrica e uma economia anual com custos de manutenção e energia elétrica da ordem de **R\$ 149mil**. **Conclusão:** Com o método proposto pode-se conhecer melhor o sistema de geração e consumo de ar comprimido e a dinâmica do centro operativo, assim como identificar pontos de melhoria e propor métodos para mensurar o nível de “saúde” do sistema. Com a otimização proposta os equipamentos permaneceram mais tempo desligados, diminuindo o desgaste do equipamento e o gasto com energia. Conseqüentemente, a partir das mudanças, há um maior tempo entre manutenções preventivas e uma menor geração de resíduos (óleo, peças, filtros, etc.).

3 PROBLEMAS E OPORTUNIDADES

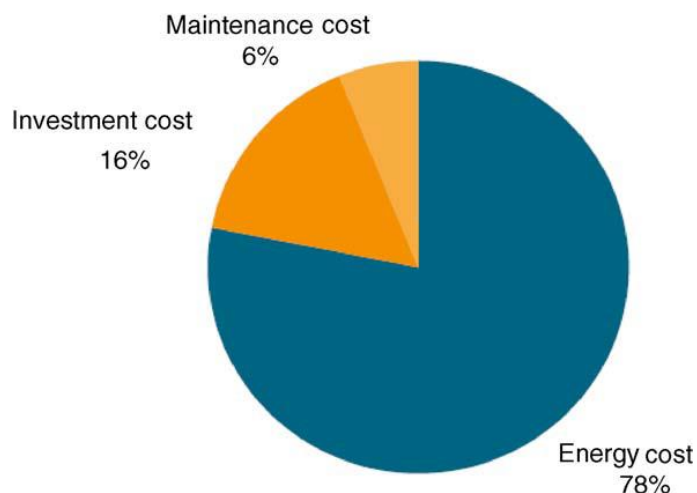
O ar comprimido é uma fonte de energia utilizada em diversas máquinas e equipamentos de longa data. É sabido que os sistemas de ar comprimido são largamente utilizados nas indústrias devido à diversos benefícios como inesgotabilidade do recurso, geração local, facilidade de transporte e armazenamento, compatibilidade com normas ATEX, etc.

O principal método de geração do ar comprimido se dá através da conversão da energia elétrica em energia potencial. Potentes motores elétricos impulsionam compressores responsáveis por comprimir o ar atmosférico a ser utilizado como fonte de energia.

Porém a utilização de tal fonte de energia também tem seus pontos fracos. Segundo Saidur (2010) o ar comprimido é uma das mais caras fontes de energia comparado a outros recursos energéticos como eletricidade, gás natural, vapor, e o seu uso somente se justifica em casos específicos onde haja aumento de produtividade, segurança e redução de mão de obra.

Como pode-se observar na Figura 1, os gastos com energia para geração de ar comprimido ao longo da vida útil do equipamento são maioria, e gastos com manutenção e investimento representam uma pequena parcela do custo total do sistema de ar comprimido.

FIGURA 1 - CUSTOS DO CICLO DE VIDA DE UM COMPRESSOR



Ainda segundo Saidur (2010), o consumo de energia elétrica para geração de ar comprimido representa cerca de 10% do consumo geral de energia elétrica na indústria da União Européia, EUA e China.

A principal matriz de energia elétrica brasileira é a gerada pelas usinas hidrelétricas. Apesar de ser uma fonte de energia renovável, a instalação de novas usinas causa um enorme impacto ambiental com a inundação de vastas áreas, desmatamento e mudança drástica no ecossistema regional. Nesse sentido, contribuir com a redu o do consumo de energia elétrica   fundamental para a preserva o do meio ambiente, diminuindo a demanda por novas fontes de energia.

Outro ponto a se considerar em um sistema de ar comprimido   o desgaste prematuro dos equipamentos. A grande maioria dos compressores   lubrificada a óleo e a gera o de resíduos decorrentes das manuten es e utiliza o dos equipamentos   uma constante. Com o desgaste prematuro e uma ineficiente utiliza o dos compressores, a tendência   que haja uma maior gera o de resíduos.

Com esta visão, prover a eficiência do sistema de ar comprimido pode gerar bons retornos ambientais e financeiros. Entendendo-se melhor o sistema de gera o e demanda de ar comprimido, assim como os custos envolvidos na gera o e utiliza o do ar,   possível aumentar a eficiência do conjunto e prover economias consideráveis a um baixíssimo custo. O investimento em pequenas modifica es, como detec o de vazamentos, suprimento da demanda, ajustes de pressão, controle inteligente da gera o, paga-se em um curto período de tempo.

O Centro Operativo da Liquigás Barueri conta com compressores de constru o recente e sempre atenderam às demandas requeridas no projeto. Porém falhas prematuras nos equipamentos e paradas para manuten o não programadas fizeram demonstrar a necessidade em se investigar a fundo o funcionamento e a rela o gera o e consumo deste recurso essencial às atividades.

Outro problema conhecido dos sistemas de ar comprimido são as perdas por vazamentos. Vazamentos em sistemas de ar comprimido são corriqueiros. Quanto maior a complexidade da rede consumidora e pontos de consumo, mais pontos de vazamentos estarão sujeitos a aparecer e maior será a dificuldade de eliminá-los. Portanto, monitorar e manter a saúde do sistema de distribui o e consumo   fundamental para a eficiência global do sistema.

4 OBJETIVOS

Com o intuito de conhecer melhor a relação geração x consumo de ar comprimido do centro operativo foram traçados os seguintes objetivos:

- Levantamento estatístico do funcionamento dos compressores;
- Temporização do funcionamento;
- Alteração da banda de pressão de trabalho;
- Redução do tempo em alívio dos compressores;
- Redução do numero de partidas dos motores e numero de mudanças dos ciclos carga/alívio;
- Criação de um índice de perdas por vazamentos na rede;
- Mapeamento dos vazamentos;

Por fim buscou-se estimar os custos gerados por vazamentos e a economia gerada pelas mudanças implementadas.

5 MATERIAIS E MÉTODOS

5.1 EQUIPAMENTOS

O Centro Operativo da Liquigás de Barueri dispõe de 3 compressores Atlas Copco GA75+ 125 FF (Figura 2), neste trabalho descritos como CP1, CP2 e CP3. Tratam-se de compressores de parafuso lubrificados à óleo e refrigerados a ar, com pressão máxima de trabalho de 8,9bar equipados com motores de 75kW partida estrela-triângulo, capazes de gerar 780 m³ de ar por hora de funcionamento cada um. Cada compressor tem seu funcionamento controlado por uma central Elektronikon Mk5 que gerencia a partida e acionamentos do compressor assim como o monitoramento dos sensores.

FIGURA 2 - COMPRESSOR SEMELHANTE AO UTILIZADO



A rede de distribuição é composta por cerca de 20 reservatórios de ar comprimido que alimentam os dispositivos consumidores, dentre os quais podemos destacar válvulas e atuadores pneumáticos, diversos cilindros pneumáticos, motores pneumáticos agitadores de tinta, pistolas de pintura airless, bombas de pintura, dentre outros. Esses equipamentos estão dispostos principalmente na rede de distribuição

do galpão de envase de botijões, sendo uma pequena parte utilizada no processo de carga e descarga de caminhões de GLP (setor conhecido como “transvaso”) e uma mínima parte em outras áreas do centro operativo.

A rede de distribuição e consumo mais complexa encontra-se no galpão de envase, sendo que a distribuição para o galpão e para o setor do transvaso é feita por um mesmo ramal principal que deriva para os 19 pulmões de ar presentes no galpão e 1 pulmão localizado no transvaso.

Um compressor de ciclo carga/alívio possui dois estados de funcionamento:

- Carga - compressor em funcionamento pressurizando a rede de ar comprimido;
- Alívio - compressor em funcionamento, porém não pressuriza a rede, só irá pressurizar quando a pressão atingir o valor programado.

A central de controle Elektronikon Mk5 de cada compressor possui diversos registros (Figura 3), onde os principais avaliados para análise estatística estão descritos à seguir:

- Horas em Funcionamento (H func) – quantidade de horas totais que o motor e o elemento compressor estiveram atuando;
- Horas em Carga (H carga) – quantidade de horas que o motor e o elemento compressor estiveram atuando em carga para pressurizar a linha de ar comprimido;
- Núm. Partidas do Motor – quantidade de vezes que o motor partiu (passou do estado desligado para o estado em funcionamento);
- Ciclos Carga/Alívio – quantidade de vezes que o elemento compressor alterou seu ciclo de funcionamento de pressurização da rede para alívio (estado em que o motor permanece ligado, porém sem carga, pronto para atuar para manter a pressão da rede)

FIGURA 3 - REGISTRO DOS CONTADORES NA IHM DE CONTROLE



5.2 CENÁRIO ANALISADO

Para se entender melhor os resultados e nortear a coleta de dados e as análises feitas, foi-se dividido o trabalho por ciclos de funcionamento do Centro Operativo: ciclo diurno e ciclo noturno. O ciclo diurno diz respeito ao período em que a principal demanda por ar comprimido engloba o engarrafamento do galpão, onde a principal produção se dá no envase de P13, P20 e P45 e onde se encontra o maior consumo diário de ar com a atuação de 2 compressores para atender a demanda (para efeitos de análise e coleta de dados este período foi compreendido entre 7:30 e 17:30 horas). O ciclo noturno trata-se do maior período diário, onde a principal demanda decorre das atividades de carga e descarga de caminhões que fazem a logística do GLP no chamado “Transvaso”, período este em que apenas 1 compressor atende à demanda (para efeitos de análise e coleta de dados este período foi compreendido entre 17:30 e 7:30 horas).

5.3 ANÁLISE ESTATÍSTICA

A partir dos dados registrados nas centrais pode-se estimar quantas horas cada compressor atuou no regime de carga, no regime de alívio e quantas horas ele permaneceu desligado durante o ciclo de **operação diurno**, assim como estimar o total trabalhado e as porcentagens de tempo que cada ciclo de trabalho representa no período analisado, da seguinte maneira:

1. Registro das horas em funcionamento e horas em carga no início do ciclo diurno (por volta das 7:30);
2. Registro das horas em funcionamento e horas em carga no encerramento do ciclo diurno (por volta das 17:30)
3. Cálculo de horas em funcionamento

$$H \text{ func.} = H \text{ func.}(\sim 17:30) - H \text{ func.}(\sim 7:30)$$

4. Cálculo da carga horária da coleta de dados (como a coleta de dados não é feita em horários precisos, para efeitos de cálculos é necessário calcular a jornada de trabalho que vai ser utilizada nos cálculos)

$$Carga \text{ horária} = H \text{ coleta fim dia}(\sim 17:30) - H \text{ coleta início dia}(\sim 7:30)$$

5. Cálculo das horas em carga

$$H \text{ carga} = H \text{ carga}(\sim 17:30) - H \text{ Carga}(\sim 7:30)$$

6. Cálculo das horas em alívio

$$H \text{ alívio} = H \text{ func} - H \text{ carga}$$

7. Cálculo das horas desligadas

$$H \text{ desl.} = Carga \text{ Horária} - H \text{ func}$$

8. Cálculos Totais dos 3 compressores

$$Total \ H \ \text{func} = H \ \text{func}(CP1) + H \ \text{func}(CP2) + H \ \text{func}(CP3)$$

$$Total \ H \ \text{carga} = H \ \text{carga}(CP1) + H \ \text{carga}(CP2) + H \ \text{carga}(CP3)$$

$$Total \ H \ \text{alívio} = H \ \text{alívio}(CP1) + H \ \text{alívio}(CP2) + H \ \text{alívio}(CP3)$$

$$Total \ H \ \text{desl.} = H \ \text{desl.}(CP1) + H \ \text{desl.}(CP2) + H \ \text{desl.}(CP3)$$

$$Total \ H = Total \ H \ \text{func} + Total \ H \ \text{desl.}$$

9. Porcentagem do tempo total em ciclo carga alívio e desligado

$$\% \ H \ \text{carga} = \frac{Total \ H \ \text{carga}}{Total \ H} \times 100$$

$$\% \ H \ \text{alívio} = \frac{Total \ H \ \text{alívio}}{Total \ H} \times 100$$

$$\% H \text{ desl.} = \frac{\text{Total H desl.}}{\text{Total H}} \times 100$$

Observação: no item 8 leva-se em consideração apenas os compressores que estavam programados para atuar naquela faixa de horário, desconsiderando os compressores que ficariam desligados fora de operação.

Cabe salientar que houve a necessidade de realizar certos arredondamentos já que os registradores possuem precisão da ordem de horas e a carga horária calculada acima (item 4) na coleta dos dados possui precisão da ordem de minutos. Estes arredondamentos influem na precisão do dado final analisado, porém o modelo apresentado se mostrou satisfatório e bem fiel à realidade, mostrando uma tendência na análise dos dados.

Analogamente, partindo dos registradores do número de partidas do motor e dos ciclos carga/alívio pode-se calcular quantas vezes o motor partiu, quantas vezes operou o ciclo carga/alívio e calcular o número de registros por intervalo de tempo, da seguinte maneira:

1. Cálculo do numero de partidas do motor

$$\text{Partidas Motor} = \text{Partidas Motor}(\sim 17:30) - \text{Partidas Motor}(\sim 7:30)$$

2. Cálculo do numero de ciclos carga/alívio

$$\text{Carga/alívio} = \text{Carga/alívio}(\sim 17:30) - \text{Carga/alívio}(\sim 7:30)$$

3. Cálculos totais dos 3 compressores

$$\text{Total Partidas Motor} = \text{Partidas Motor}(CP1) + \text{Partidas Motor}(CP2) + \text{Partidas Motor}(CP3)$$

$$\text{Total Carga/alívio} = \text{Carga/alívio}(CP1) + \text{Carga/alívio}(CP2) + \text{Carga/alívio}(CP3)$$

4. Cálculo do número de partidas do motor por hora

$$\text{Partidas Motor/H} = \frac{\text{Total Partidas Motor}}{\text{Carga horária}}$$

5. Cálculo do número de ciclos carga/alívio por hora

$$\text{Carga/alívio /H} = \frac{\text{Total Carga/alívio}}{\text{Carga horária}}$$

Para os cálculos do **ciclo noturno** utilizou-se o mesmo método acima, porém o intervalo de tempo utilizado das medições se deu por volta das 17:30 do dia atual

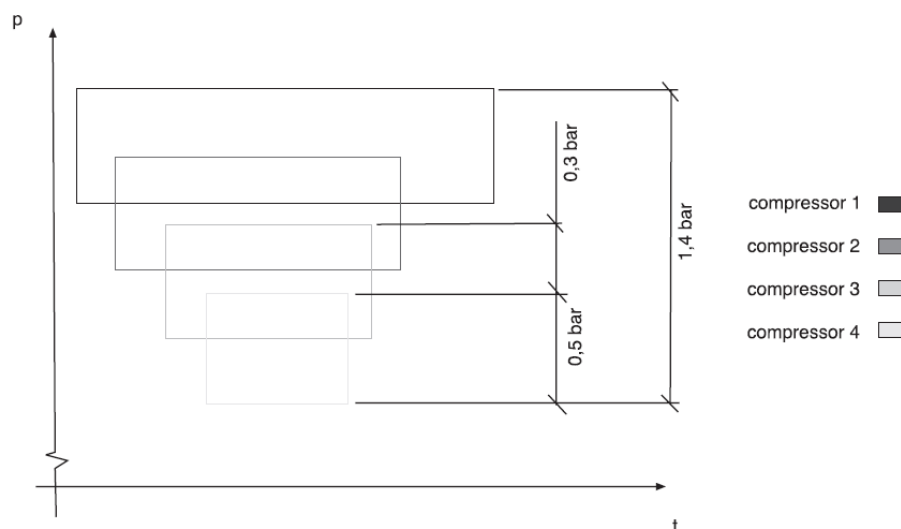
até por volta das 7:30 do dia subsequente. Englobando o funcionamento noturno do centro operativo onde a principal atividade é demandada pelo funcionamento de apenas um compressor. Sendo assim a análise é feita com base no compressor que atuará individualmente no período.

5.4 ALTERAÇÃO DA BANDA DE PRESSÃO DE TRABALHO E CASCATEAMENTO

Em uma análise preliminar verificou-se que os 3 compressores que alimentam toda a rede de ar comprimido estavam atuando na mesma banda de pressão (7,5 a 8,5 Bar). No funcionamento do ciclo diurno observou-se que os compressores atuavam praticamente em sincronia na entrada e saída dos ciclos de carga e alívio, o que fazia com que os compressores não desligassem completamente, devido ao pequeno intervalo de tempo entre ciclos, haja vista que o controlador não permite um numero excessivo de partidas do motor para conservar o equipamento.

Como a demanda por ar comprimido não se dá de forma de forma constante ao longo do dia, isto é, existem picos por demanda e momentos de demanda baixa onde um só compressor se faz necessário, verificou-se que haveria a possibilidade de se avaliar a mudança das bandas de pressão de trabalho dos compressores. Esta mudança poderia ser implementada através do controle em cascata das bandas de pressão dos 2 compressores que atuam no ciclo diurno. Pode-se observar claramente na Figura 4 um exemplo deste método de controle.

FIGURA 4 - EXEMPLO DE CONTROLE EM CASCATA NA OPERAÇÃO DE 4 COMPRESSORES



Com o controle em cascata a demanda é atendida de acordo com a variação da pressão da rede, nos momentos em que a demanda é mais alta a pressão do sistema abaixa e apenas um compressor atuando não dá conta de suprir, é neste momento que o compressor secundário entra em atuação para manter o mínimo necessário na rede. Nos momentos em que a demanda é baixa, o compressor secundário fica desligado pois há um aumento no tempo entre ciclos. Desta forma, este compressor que está em uma banda de pressão mais baixa trabalha menos durante o ciclo de operação diurno.

A programação dos compressores na central permite a seleção de até duas faixas de pressão de trabalho em cada máquina. Desta maneira procurou-se adequar faixas para que se fizesse a programação em cascata da operação dos dois compressores ligados durante o ciclo diurno.

Após estudos dos equipamentos e da rede de ar comprimido chegou-se ao consenso de que a pressão mínima admissível na unidade geradora é de 7,0 Bar para operar com segurança o sistema sem perdas significativas. Como pressão máxima admissível estipulou-se 8,7 Bar no cascadeamento. As faixas de pressão utilizadas (aqui descritas como Set Point) ficaram da seguinte forma:

Set Point 1 = 8,0 Bar (pressão de carga) a 8,7 Bar (pressão de alívio)

Set Point 2 = 7,0 Bar (pressão de carga) a 8,5 Bar (pressão de alívio)

5.5 TEMPORIZAÇÃO

O controlador Elektronikon Mk5 permite programar o compressor para um ciclo semanal de funcionamento, onde pode-se determinar ações como o ligar e desligar do compressor assim como selecionar quais das duas possíveis faixas de pressão o compressor irá operar. Na Tabela 1 segue exemplo da programação que foi implementada de acordo com a demanda do Centro Operativo.

TABELA 1 - PROGRAMAÇÃO HORÁRIA DOS COMPRESSORES

	segunda-feira	terça-feira	quarta-feira	quinta-feira	sexta-feira	sábado	domingo
CP1	Start - 6:30	Stop - 6:30	Start - 8:00	Start - 6:30	Stop - 6:30	Start - 8:00	NULL
	Set Point 1 - 6:31		Set Point 2	Set Point 1 - 6:31		Set Point 2	
	Set Point 2 - 19:00		Stop - 19:00	Set Point 2 - 19:00		Stop - 19:00	
CP2	Start - 8:00	Start - 6:30	Stop - 6:30	Start - 8:00	Start - 6:30	Stop - 6:30	NULL
	Set Point 2	Set Point 1 - 6:31		Set Point 2	Set Point 1 - 6:31		
	Stop - 19:00	Set Point 2 - 19:00		Stop - 19:00	Set Point 2 - 19:00		
CP3	NULL	Start - 8:00	Start - 6:30	Stop - 6:30	Start - 8:00	Start - 6:30	Stop - 6:00
		Set Point 2	Set Point 1 - 6:31		Set Point 2	Set Point 1 - 6:31	
		Stop - 19:00	Set Point 2 - 19:00		Stop - 19:00	Set Point 2 - 19:00	
	Ficará ligado	seg>ter	ter>qua	qua>qui	qui>sext	sext>sab	sab>dom
		1	2	3	1	2	3

Durante o ciclo noturno estipulou-se o uso do Set Point 2, devido à baixa demanda por ar nesta faixa horária.

5.6 ÍNDICE DE VAZAMENTOS DA REDE

Para se mensurar a quantidade de vazamentos da rede de distribuição e consumo de ar comprimido, propôs-se o seguinte método de análise: com a rede toda pressurizada (dutos, reservatórios e consumidores finais), porém com os dispositivos e operações fora de funcionamento, mede-se quanto tempo um único compressor precisa atuar para alimentar os vazamentos da rede. Através dessa medição calcula-se a porcentagem de tempo entre a pressurização e despressurização da rede, podendo-se quantificar a vazão cúbica destes vazamentos. Essa medição foi feita utilizando-se um crômetro digital.

Medidos os tempos de alívio e compressão de um compressor calcula-se a metragem cúbica dos vazamentos através da fórmula:

$$Q_{vaz} \times T = Q_{comp} \times t$$

$$Q_{vaz} = \frac{Q_{comp} \times t}{T}$$

Em que:

Q comp = capacidade nominal de produção do compressor usado no teste (m³/min);

T = tempo total (alívio + compressão) registrado no primeiro cronômetro (min);

Q vaz = vazão atribuída aos vazamentos (m³/min); e

t = tempos do compressor em carga (compressão) registrado pelo segundo cronômetro.

A partir dos dados de tempo ou da metragem cúbica coletados e calculados, pode-se quantificar percentualmente as perdas globais do sistema. Utiliza-se a seguinte fórmula:

$$\%perdas = \frac{Q_{vaz}}{Q_{global}} \cdot 100 \text{ ou } \%perdas = \frac{t}{T}$$

Observação 1: esse índice de perdas foi calculado levando-se em consideração a produção de apenas um compressor e não faz referência ao percentual de vazamento do volume total de ar comprimido produzido diariamente, já que a geração de ar comprimido varia ao longo do dia de acordo com a demanda consumidora. Ou seja, este índice serve para acompanhar apenas o percentual da demanda necessária para suprir vazamentos.

Observação 2: quanto maior a quantidade de ciclos carga/alívio utilizados nas medições, maior será a precisão do cálculo percentual de vazamentos.

5.7 MAPEAMENTO DOS VAZAMENTOS

Com o cálculo do índice de vazamentos global do sistema tem-se uma noção de como as perdas das unidades consumidoras afetam a geração de ar comprimido. Porém para atuar e propor ações para sanar vazamentos é interessante conhecer os pontos críticos da rede. Por se tratar de uma rede complexa, foi proposto fazer medições individuais dos 20 reservatórios de ar comprimido que distribuem para a rede final de consumo.

Estas medições baseiam-se na técnica de cronometrar a queda de pressão no reservatório. Fechando-se a entrada de ar do reservatório com as operações e equipamentos parados, a pressão do reservatório tenderá a cair por conta dos vazamentos. Conhecendo-se o volume do reservatório é possível calcular a taxa de vazão pela seguinte fórmula:

$$Q_{vaz} = \frac{\Delta P \times V}{t}$$

Onde:

ΔP = Diferença de pressão

V = Volume do reservatório

t = Tempo

6 CRONOGRAMA

Período	Etapa
18/05 a 22/07	Coleta de dados
18/05 a 22/05	Período de coleta de dados utilizado como referência (antes das mudanças)
30/05 a 22/07	Alteração das pressões (Cascadeamento)
14/07 a 22/07	Mudança realizada na operação de consumo, registro de dados para comparação
13/07 a 22/07	Medição de tempos para cálculo percentual de vazamentos
21/08 a 31/08	Mapeamento dos vazamentos

7 RESULTADOS

7.1 RESULTADOS CICLO DIURNO (7:30~17:30)

Na tabela 2 estão apresentadas as médias referentes ao período analisado para cada compressor. Pode-se notar claramente que após a implementação do cascadeamento os compressores passaram de 13,36% para cerca de 40% do tempo desligados. Em compressores de ciclo carga/alívio, o tempo de alívio é o principal vilão da eficiência energética, já que neste estado de funcionamento o motor permanece operante, consumindo energia elétrica porém sem gerar ar comprimido.

TABELA 2 - MÉDIAS DE PORCENTAGEM DE TEMPO EM CADA REGIME DE TRABALHO

Período	% carga	%alívio	% desl
Referencia - 18/05 a 22/05	49,27	37,37	13,36
Cascadeamento - 30/05 a 22/07	48,30	11,67	40,03

A tabela 3 apresenta as médias do total de partidas dos motores assim como a media total de alívios do sistema compressor. Em termos de quantidade de partidas do motor por hora de funcionamento e mudança de ciclos carga/alívio, pode-se notar uma redução de cerca de 58% e 47% respectivamente.

A vantagem em ter menos partidas do motor elétrico se reflete no consumo energético, haja vista que em motores dotados de partida estrela-triângulo o pico de consumo é alto.

Além disso, um numero menor de ciclos carga/alívio garantirá uma vida útil maior aos componentes do sistema, causando menor stress mecânico ao conjunto.

TABELA 3 - MÉDIAS TOTAL DE PARTIDAS E ALÍVIOS

Período	Total Partidas	Total alívios	Partidas/H	Cargaalívio/H
Referência 18/05 a 22/05	40,00	86,80	4,27	9,15
Cascadeamento 30/05 a 22/07	20,17	44,38	1,81	4,81

Nos gráficos 1 e 2 pode-se acompanhar a evolução do consumo ao longo dos períodos analisados.

GRÁFICO 1 - PORCENTAGEM DE HORAS POR REGIME DE TRABALHO

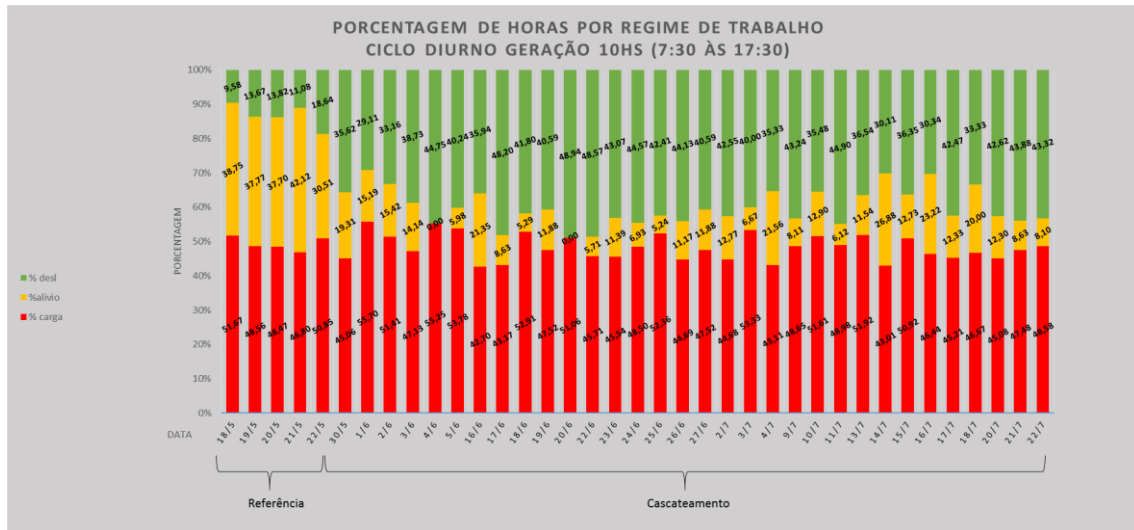
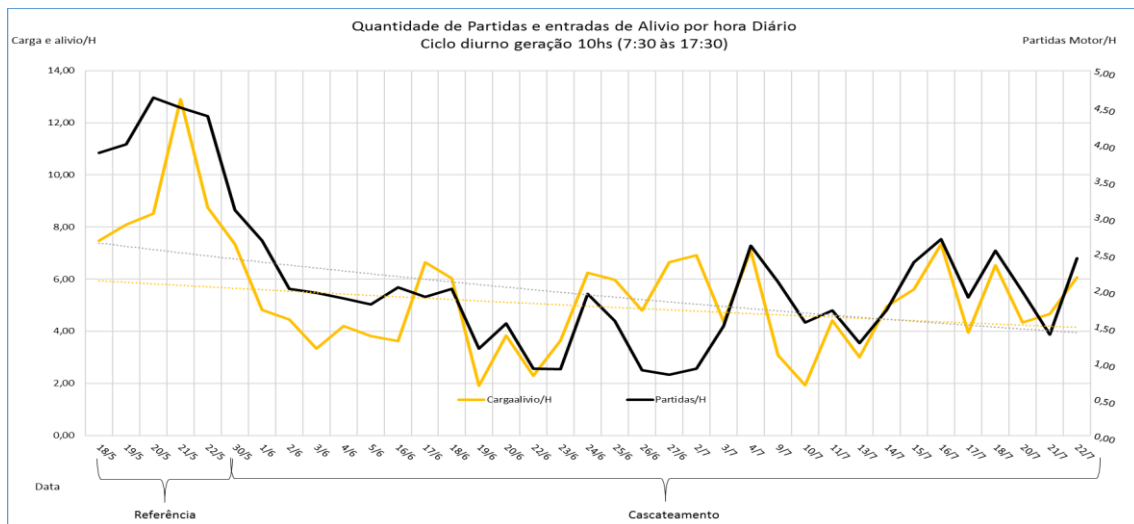


GRÁFICO 2 - QUANTIDADE DE PARTIDAS E ALÍVIOS POR HORA DIÁRIO



7.2 RESULTADOS CICLO NOTURNO (17:30~7:30)

Na tabela 4 estão apresentadas as médias referentes aos períodos analisados. Após a mudança da faixa de pressão do ciclo noturno de 7,5 a 8,5 Bar para 7,0 a 8,5 Bar houve um ligeiro aumento da porcentagem de tempo desligado do compressor, porém a redução do percentual de tempo em carga foi pouco expressiva. Isso se justifica pela quantidade de vazamentos na rede, haja vista que o consumo de ar comprimido no período noturno é muito baixo em relação ao consumo do galpão de envase.

Com o fechamento dos reservatórios ao fim das operações de envase houve um aumento de 1182% no tempo que o compressor permaneceu desligado durante a noite. Passando de aproximadamente 1 hora para 11,9 horas o tempo em que o compressor permanece desligado no ciclo noturno.

TABELA 4 - MÉDIAS DE PORCENTAGEM DE TEMPO EM CADA REGIME DE TRABALHO

Período	% carga	%alivio	% desl
Referência - 18/05 a 22/05	40,66	52,14	7,20
Cascadeamento - 30/05 a 13/07	37,09	42,30	20,61
Fechamento - 14/07 a 22/07	9,54	5,44	85,02

A tabela 5 apresenta as médias do total de partidas dos motores assim como a media total de alívios do sistema compressor no ciclo noturno. Com o fechamento dos reservatórios, em termos de quantidade de partidas do motor por hora de funcionamento e mudança de ciclos carga/alívio, pode-se notar uma redução de cerca de 52% e 79% respectivamente, em relação ao período de referência.

TABELA 5 - MÉDIAS TOTAL DE PARTIDAS E ALÍVIOS

Período	Total Partidas	Total alívios	Partidas/H	Cargaalívio/H
Referência 18/05 a 22/05	40,60	207,80	2,86	14,60
Cascadeamento 30/05 a 13/07	37,33	165,83	2,49	11,06
Fechamento 14/07 a 22/07	17,88	40,38	1,38	3,09

Nos gráficos 3 e 4 pode-se acompanhar a evolução do consumo ao longo dos períodos analisados.

GRÁFICO 3 - PORCENTAGEM DE HORAS POR REGIME DE TRABALHO

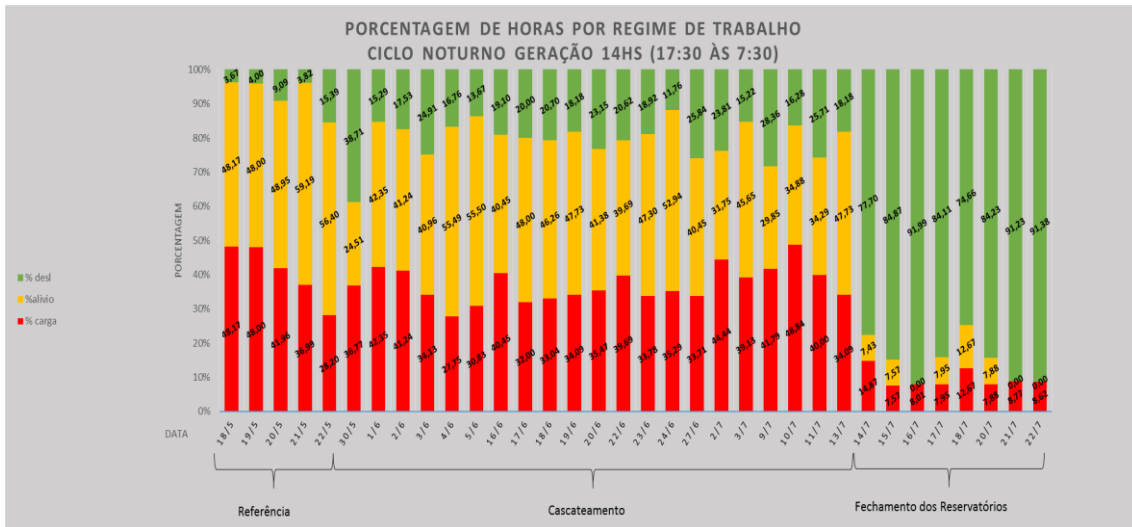
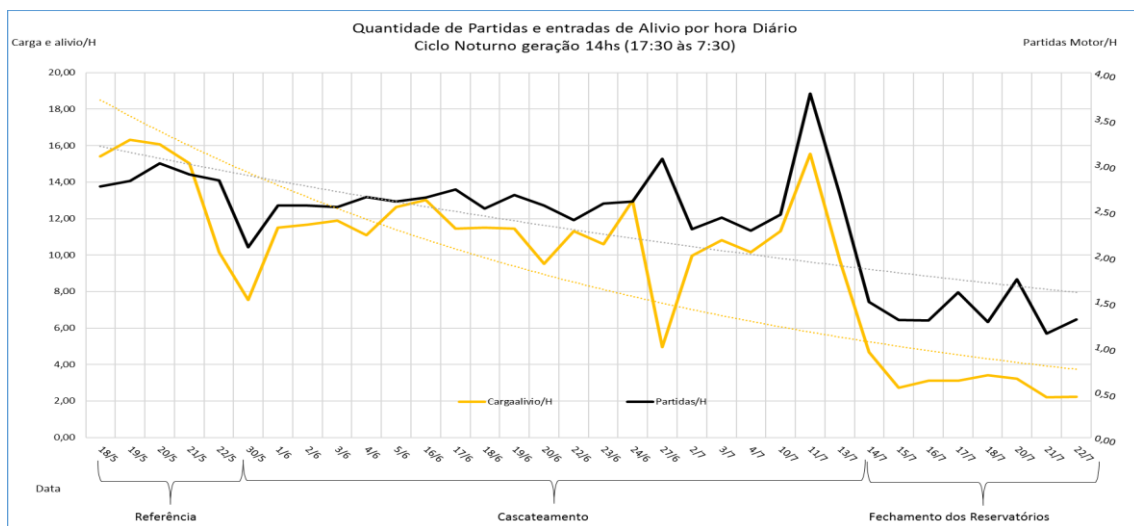


GRÁFICO 4 - QUANTIDADE DE PARTIDAS E ALÍVIOS POR HORA DIÁRIO



7.3 CÁLCULO PERCENTUAL DE VAZAMENTOS

Na Tabela 6 estão registradas as medições feitas dos tempos do ciclo carga/alívio e calculados os percentuais de vazamento encontrados. As medições foram feitas em determinados dias por volta das 20 horas onde todas as operações do centro operativo encontram-se paradas, possibilitando pressurizar o sistema apenas para alimentar os vazamentos presentes na rede de ar comprimido.

As medidas foram tomadas para os 3 compressores disponíveis na unidade em datas diferentes para se ter uma média mais precisa e mais abrangente da quantidade percentual de vazamentos da rede.

TABELA 6 - ÍNDICE PERCENTUAL DE VAZAMENTOS

Compressor analisado	Data	Tempo Total (Alívio + compressão)[s]	Tempo em carga (compressão) [s]	Tempo em alívio[s]	Qcomp [m³/h]	Qvaz [m³/h]	% VAZAMENTO
CP1	13/jul	05:42,9	02:03,3	03:39,6	780,48	280,69	35,96
CP2	14/jul	11:12,8	04:24,9	06:48,0	780,48	307,23	39,36
CP3	15/jul	04:57,4	02:08,0	02:49,4	780,48	335,81	43,03
CP1	16/jul	11:01,6	04:14,7	06:46,9	780,48	300,49	38,50
CP2	17/jul	10:49,1	04:18,6	06:30,5	780,48	310,93	39,84
CP3	22/jul	11:23,6	04:15,1	07:08,5	780,48	291,25	37,32
						Média Total	39,00

O índice de vazamento global do período analisado corresponde a 39% da capacidade de produção de 1 compressor disponível. Acompanhar este índice é fundamental para monitorar a saúde do sistema.

7.4 MAPEAMENTO DOS VAZAMENTOS

Na Tabela 7 pode-se observar quais os principais vasos de pressão responsáveis pelos vazamentos na rede de ar comprimido. Desta forma tem-se uma noção mais clara dos pontos críticos que merecem atenção para manutenção da rede.

TABELA 7 - QUANTIDADE DE VAZAMENTOS EM CADA VASO DE PRESSÃO

Vaso de Pressão	T1	T2	T3	Média(s)	Média(h)	Faixa de pressão analisada	Delta P	V Pulmão (m³)	Vaz (m³/h)	%	% de 1cp
VP-19	300,00	300,00	300,00	300,00	0,0833333	7,5 a 7 bar	0,5	0,106	0,64	0,20	0,08
VP-20	56,91	60,92	51,38	56,40	0,0156676	8 a 6 bar	2	0,106	13,53	4,29	1,73
VP-22	300,00	300,00	300,00	300,00	0,0833333	7,5 a 7 bar	0,5	0,106	0,64	0,20	0,08
VP-23	300,00	300,00	300,00	300,00	0,0833333	7,5 a 7 bar	0,5	0,106	0,64	0,20	0,08
VP-24	17,97	16,46	16,25	16,89	0,0046926	8 a 6 bar	2	0,106	45,18	14,33	5,79
VP-25	32,17	26,86	27,15	28,73	0,0079796	7 a 6 bar	1	0,106	13,28	4,21	1,70
VP-26	300,00	300,00	300,00	300,00	0,0833333	7,5 a 7 bar	0,5	0,106	0,64	0,20	0,08
VP-27	23,31	26,56	26,72	25,53	0,0070917	8 a 6 bar	2	0,106	29,89	9,48	3,83
VP-28	56,13	52,43	52,60	53,72	0,0149222	7 a 6 bar	1	0,106	7,10	2,25	0,91
VP-29	27,50	25,58	24,54	25,87	0,0071870	7 a 6 bar	1	0,106	14,75	4,68	1,89
VP-30	57,64	58,94	54,84	57,14	0,0158722	8 a 6 bar	2	0,106	13,36	4,24	1,71
VP-31	8,20	8,39	8,24	8,28	0,0022991	7 a 6 bar	1	0,106	46,11	14,63	5,91
VP-32	47,65	45,95	45,34	46,31	0,0128648	7 a 6 bar	1	0,106	8,24	2,61	1,06
VP-33	19,83	19,28	18,80	19,30	0,0053620	7 a 6 bar	1	0,106	19,77	6,27	2,53
VP-34	16,77	14,78	14,71	15,42	0,0042833	7 a 6 bar	1	0,106	24,75	7,85	3,17
VP-35	39,40	31,93	31,29	34,21	0,0095019	7 a 6 bar	2	0,106	22,31	7,08	2,86
VP-36	19,57	17,83	17,86	18,42	0,0051167	7 a 6 bar	1	0,106	20,72	6,57	2,65
VP-37	300,00	300,00	300,00	300,00	0,0833333	7,5 a 7 bar	0,5	0,106	0,64	0,20	0,08
VP-40	300,00	300,00	300,00	300,00	0,0833333	7,5 a 7 bar	0,5	0,106	0,64	0,20	0,08
VP-41	186,00	186,00	186,00	186,00	0,0516667	5 a 4 bar	1	0,106	2,05	0,65	0,26
Vazamentos rede geral (linha geral subterrânea e aérea, linha transpetro, esferas, patio de OM)									30,34	9,63	3,89
Total									315,19	100,00	40,38

8 CÁLCULO ESTIMADO DE CUSTO DOS VAZAMENTOS

Após medições realizadas estimou-se os seguintes consumos para cada compressor:

- Compressor em alívio = Potência 33,28 kW
- Compressor em carga = Potência 80,95 kW
- Preço médio do kWh – R\$0,50

Levando-se em consideração 39% (índice de vazamento) do tempo em carga de 24hs e 52% do tempo em alívio de 14hs(ciclo noturno vazamento impedindo desligamento do compressor). Tem-se um consumo energético anual de:

$$\text{Energia (E)} = \text{Tempo} * \text{Potencia}$$

$$E \text{ diário} = 0,39*24*80,95 + 0,52*14*33,28$$

$$E \text{ diário} = 1000,63 \text{ kWh}$$

$$E \text{ anual} = 1000,63 * 6 \text{ dias na semana} * 52,1426 \text{ semanas}$$

$$E \text{ anual} = 313052 \text{ kWh}$$

$$R\$ \text{ anual energia} = 156.526,00$$

Levando-se em consideração o preço médio da manutenção (8000h) – R\$3,64 / h de funcionamento. Tem-se o custo estimado de manutenção do equipamento:

$$\text{Tempo funcionamento diário} = 0,39*24 + 0,52*14 = 16,64 \text{ h}$$

$$\text{Tempo funcionamento anual} = 16,64*6*52,1426 = 5206 \text{ h}$$

$$R\$ \text{ manutenção anual} = 5206 * 3,64 = 18.937,00$$

Logo, tem-se um custo total anual gerado por vazamentos da ordem de **R\$ 175 mil.**

9 CÁLCULO ESTIMADO DE ECONOMIA

Após a coleta dos dados pode-se notar que os compressores permanecem muito mais tempo desligados, sendo assim pode-se estimar a economia financeira que a implantação das mudanças trará a longo prazo. Esses valores baseiam-se na taxa média vigente cobrada de energia elétrica assim como os gastos com a manutenção preventiva de 8000 horas de funcionamento dos compressores. Os cálculos são uma estimativa com base no cenário citado e não são garantia de que irão transcorrer devido às diversas variáveis envolvidas. O cálculo estimado também não leva em conta os picos de consumo energético decorrentes da partida dos motores que causam grande impacto final no consumo.

9.1 ECONOMIA CICLO DIURNO

9.1.1 Economia energética ciclo diurno

Levando-se em consideração os seguintes fatores:

- Compressor em alívio = Potência 33,28 kW;
- Compressor em carga = Potência 80,95 kW;
- Cada compressor atua 4 vezes na semana durante o ciclo diurno;
- Porcentagens Tabela 2;
- Ciclo diurno de 10 horas;

Segue o cálculo:

Preço do kwh	R\$ 0,50					
Potencia	Carga (kW)	Alivio(kW)				
	80,95	33,28				
			Antes (kWh)	Depois (kWh)		
Energia diaria 1 cp			523,21	429,85		
Energia semanal 3cps			6278,58	5158,18	Economia	
Energia anual			327381,42	268960,95	58420,46	kWh
		Custo	R\$ 163.690,71	R\$ 134.480,48	R\$ 29.210,23	

O que representa uma economia de consumo anual de 58420,46 kWh.

A um custo de kWh de R\$0,50 tem-se:

- **Economia de custo energético anual ciclo diurno R\$ 29.210,23**

9.1.2 Economia com manutenção do equipamento ciclo diurno

Com base no custo de manutenção preventiva de 8000hs de funcionamento do compressor no valor de R\$29.100,00, estimou-se o custo de manutenção no valor de R\$ 3,64 por hora de funcionamento do compressor.

Levando-se em consideração os seguintes fatores:

- Cada compressor atua 4 vezes na semana durante o ciclo diurno;
- Porcentagens Tabela 2;
- Ciclo diurno de 10 horas;

Segue o cálculo:

Preço h de funcionamento manutenção	R\$ 3,64		
	Antes (h)	Depois(h)	
horas de funcionamento diario 1cp	8,66	6,00	
horas de funcionamento semanal 3 cp	103,97	71,97	
horas de funcionamento anual	5421,24	3752,48	Economia
Custo anual manutenção	R\$ 19.733,31	R\$ 13.659,01	R\$ 6.074,30

- Economia anual com manutenção ciclo diurno R\$6.074,30

9.2 ECONOMIA CICLO NOTURNO

9.2.1 Economia energética ciclo noturno

Levando-se em consideração os seguintes fatores:

- Compressor em alívio = Potência 33,28 kW;
- Compressor em carga = Potência 80,95 kW;
- Cada compressor atua 2 vezes na semana durante o ciclo noturno;
- Porcentagens Tabela 4;
- Ciclo noturno de 14 horas;

Segue o calculo:

Preço do kwh	R\$ 0,50				
Potencia	Carga (kW)	Alivio(kW)			
	80,95	33,28			
			Antes (kWh)	Depois (kWh)	
Energia diaria 1 cp			703,77	133,49	
Energia semanal 3cps			4222,65	800,91	Economia
Energia anual			220179,76	41761,63	178418,13 kWh
		Custo	R\$ 110.089,88	R\$ 20.880,81	R\$ 89.209,07

O que representa uma economia de consumo anual de 178418,13 kWh.

A um custo de kWh de R\$0,50 tem-se:

- Economia de custo energético anual ciclo noturno R\$ 89.209,07

9.2.2 Economia com manutenção do equipamento ciclo noturno

Com base no custo de manutenção preventiva de 8000hs de funcionamento do compressor no valor de R\$29.100,00, estimou-se o custo de manutenção no valor de R\$ 3,64 por hora de funcionamento do compressor.

Levando-se em consideração os seguintes fatores:

- Cada compressor atua 2 vezes na semana durante o ciclo noturno;
- Porcentagens Tabela 4;
- Ciclo noturno de 14 horas;

Segue o cálculo:

Preço h de funcionamento manutenção	R\$ 3,64		
	Antes (h)	Depois(h)	
horas de funcionamento diario 1cp	12,99	2,10	
horas de funcionamento semanal 3 cp	155,91	25,17	
horas de funcionamento anual	8129,65	1312,31	Economia
Custo anual manutenção	R\$ 29.591,92	R\$ 4.776,82	R\$ 24.815,10

- Economia anual com manutenção ciclo noturno R\$24.815,10

9.3 ECONOMIA ANUAL TOTAL ESTIMADA

Somando-se as economias de energia elétrica e manutenção preventiva dos compressores, pode-se estimar um custo total anual economizado com as mudanças implementadas de **R\$ 149.308,70**.

Do ponto de vista energético, a economia anual projetada com as ações propostas é da ordem de **236,84 MWh**.

10 CONCLUSÕES

Pode-se citar os seguintes pontos a partir das mudanças implementadas:

- A temporização do funcionamento dos compressores possibilitou um desgaste uniforme dos equipamentos e atendimento da demanda com pontualidade;
- Alteração da banda de trabalho – otimização da relação geração x consumo;
- Com a redução do tempo de funcionamento dos equipamentos houve menor desgaste e maior economia de energia;
- A redução dos ciclos carga/alívio causa um menor desgaste mecânico dos compressores, aumentando da vida útil do equipamento;
- Índice percentual de vazamentos permite um monitoramento da “saúde” da rede de ar comprimido, acompanhar este índice e propor ações para sanar vazamentos é fundamental para evitar desperdícios;
- Conhecer e entender melhor os custos permite direcionar investimentos (tempo e recursos financeiros);

Como resultado principal dos esforços direcionados, tem-se a redução do consumo de energia elétrica e geração de resíduos decorrente de manutenções.

As ações propostas baseiam-se em análise geraçãoXconsumo consciente, as mudanças implementadas não exigiram mudanças estruturais nas instalações ou sistemas, apenas alguns ajustes técnicos foram necessários.

O uso consciente de ar comprimido assim como o monitoramento e quantificação das perdas por vazamento garantirão uma melhora na entrega do suprimento ao sistema, aumentando a eficiência da geração e consumo, reduzindo o consumo energético e aumentando o tempo entre manutenções. O sistema de ar comprimido ganha com a maior confiabilidade do funcionamento dos equipamentos e prolongamento da vida útil do conjunto como um todo.

11 OPORTUNIDADES DE MELHORIA

Com o desenvolvimento de um método para se medir a taxa de vazamentos do sistema é interessante que se crie um plano de ação para redução do índice percentual de vazamentos, o qual atualmente se mostra muito elevado, possibilitando que se acompanhe a eficácia das ações propostas. Traçando-se metas para redução de vazamentos pode-se manter a robustez do sistema de ar comprimido, evitando desperdícios desnecessários e contribuindo para a economia de recursos. Medições periódicas do índice percentual de vazamentos podem prover dados para acompanhar a evolução das medidas tomadas e a evolução do desgaste da rede de ar comprimido como um todo.

Foi identificado ainda a oportunidade de se estudar a viabilidade da mudança do sistema elétrico dos compressores. Atualmente trabalha-se com o sistema carga/alívio, porém em alguns casos é mais vantajoso soluções que envolvam sistemas com ajuste variável de velocidade, com a possibilidade de reduzir o tempo ocioso da máquina.

12 RESPONSÁVEL PELO PROJETO DENTRO DA LIQUIGÁS

Nicolas Gheno Karacristo – Oficial de Manutenção - Elétrica

- E-mail: ngkaracristo@liquigas.com.br
- Telefones: (11) 3544-3217 (11) 96622-0302

13 REFERÊNCIAS

MONTEIRO, M.A.G.; ROCHA, C.A. Eficiência energética em sistemas de ar comprimido. Rio de Janeiro: Eletrobras; Procel, 2005. 208 p. (Manual Prático)

Manual de Instruções para Compressores GA 55 +, GA 55, GA 75+, GA 75, GA 90. N° 0015 0004 01 - 06/2016 - Web-site: <http://www.atlascopco.com.br>

ANEEL/ANP. Eficiência Energética: Integrando Usos e Reduzindo Desperdícios, Brasília, 432p, 1999.

ATLAS COPCO. Compressed air engineering. Suécia: Atlas Copco Literature Department, 1971. 1 volume, 360 páginas.

SAIDUR, R., RAHIM, N.A., HASANUZZAMAN, M., “A review on compressed-air energy use and energy savings”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14, 1135–1153 (2010). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.11.013>