

# Estudo, Avaliação e Implementação de Melhorias de uma Instalação de Geração de Ar Comprimido

Carlos Roberto Altafani\* e Claudir Pereira Nunes†

## Resumo

Este trabalho apresenta um estudo de um sistema de geração de ar comprimido em um fabricante de ônibus rodoviário. Primeiramente, avaliou-se o funcionamento dos compressores para se determinar o consumo de energia elétrica e se identificar um possível aproveitamento da energia térmica liberada pelos mesmos. Ainda, os principais pontos de vazamentos da rede de ar comprimido foram identificados para que uma ação corretiva fosse tomada. Para o desenvolvimento deste trabalho, é inicialmente feita uma revisão dos conceitos fundamentais envolvidos, sendo, em linhas gerais, revisados os conceitos básicos de transformações termodinâmicas. Uma introdução à energia elétrica é apresentada para levar ao entendimento do consumo dos compressores. Uma abordagem geral sobre o sistema de geração de ar comprimido é mostrada com o intuito de compreender técnicas de eficiência energética. As ferramentas utilizadas no desenvolvimento do trabalho foram basicamente analisadores de energia. A proposta de redução do consumo de energia elétrica com a instalação de um gerenciador foi alcançada, ou seja, houve uma redução de aproximadamente 60.600 kWh mensais, o que proporcionou uma economia mensal de R\$19.400,00, validando o levantamento de dados. Para o aproveitamento de energia térmica foi dimensionada uma serpentina de aquecimento de água que poderá ser usada em um processo de aquecimento de guarnições de borracha. Além disso, para sanar os vazamentos na rede de ar comprimido foi implantado um plano de manutenção, permitindo a redução dos vazamentos de ar em quase 50%.

## Palavras-chave

Transformações termodinâmicas, eficiência energética, compressores, compressores de parafuso.

# Study, Evaluation and Implementation of Improvement in a Compressed Air Plant

## Abstract

This paper presents a study of a compressed air generation system in a bus manufacturer, being evaluated the operation of the compressors to identify the electric energy consumption. A maintenance plan is elaborated to correct the air system leaks and also proposes the reuse of thermal energy generated by the compressors. Initially, as for the purpose of this paper, a revision of fundamentals related to thermodynamics transformation is presented. Afterwards, some important electric energy concepts will lead to the understanding of the energy consumption of the compressors. Then, an overview about compressed air generation systems will be showed with the goal of understanding techniques of energetic efficiency. The tools used in this study for collecting data were the software of a compressor manufacturer with pressure transducers and an energy analyzer. The basic concepts and their uses will be shown along this paper. The proposal of electric energy consumption reduction was achieved with the installation of compressor operation managers and yields a reduction about 60,600 kWh per month, which provided a monthly saving of R\$19,400.00, validating the collected data. For heat recovery from the cooling air compressors, externally finned coils were sized to heat water up to 55°C and used in a process of heating rubber gaskets. For air leakage reduction, a working methodology to perform the corrective and preventive maintenance has been prepared, and a control system in the form of internal audit. The obtained air leakage reduction was about 50%.

## Keywords

thermodynamic transformation, energy efficiency, compressors, screw compressors.

## I. INTRODUÇÃO

Aliado ao crescimento da competitividade mundial, o crescimento no consumo de energia elétrica (EE) da indústria no

\* Centro de Ciências Exatas e Tecnologia - Universidade de Caxias do Sul;  
† Marcopolo S.A.

Data de envio: 28/04/2013

Data de aceite: 10/07/2013

<http://dx.doi.org/10.18226/23185279.v1i1p11>

Brasil aumentou devido a diversos fatores, mas principalmente ao crescimento elevado da produção. Foi possível notar o crescimento de 47,9% nos últimos 10 anos no setor energético industrial [1], cenário esse que obriga a todos a preocuparem-se com o uso racional da energia. Devido a esses aspectos foram criados no Brasil alguns programas que apóiam a melhoria da eficiência energética, entre eles, o PROCEL (Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica) da Eletrobrás. Esse programa teve origem na época da crise do abastecimento de energia elétrica, em meados de 2001, quando o Governo Federal instituiu a Câmara de Gestão da Crise de

Energia, com a finalidade de elaborar um Plano Estratégico Emergencial de Energia Elétrica. No âmbito industrial, que em 2010 correspondeu a uma fatia de 43,9% do consumo de EE, foi criado o projeto de Otimização Energética de Sistemas Motrizes, o qual teve como uma de suas vertentes de ações a utilização de motores de alto rendimento. As organizações que desejam ser competitivas no mercado não podem ignorar os projetos e programas que lhes proporcionem diminuição no custo de EE, pois a economia gerada pode ser um diferencial na conquista de novos mercados e clientes.

O consumo de energia está diretamente relacionado com a utilização de força motriz que corresponde 61,8% do consumo das indústrias, energia essa usada para acionar equipamentos e sistemas onde também podem ser aplicadas medidas de eficiência energética [1]. O elevado consumo de EE apresentado pelos sistemas motrizes, maior até que os demais segmentos individualmente, torna esses sistemas o principal foco de atuação de programas de eficiência energética voltados ao setor industrial. O consumo industrial tem como um de seus maiores consumidores de energia a compressão de ar, que pode variar de 10 a 15% de seu montante [2], [3], [4]. É importante também destacar que, como descrito em [3], [5], 70% da EE consumida pelo compressor é dissipada para o ambiente na forma de calor.

Os sistemas de ar comprimido são amplamente usados como fonte de energia, sendo frequentemente considerados como a quarta utilidade da indústria [6]. Quase toda instalação industrial, desde uma pequena oficina até uma grande empresa, tem algum sistema de ar comprimido. Apesar da diversidade de aplicações para o ar comprimido, os compressores de parafusos hoje são os mais utilizados, especialmente aqueles de velocidade variável. O movimento dos parafusos provoca uma depressão no interior da unidade compressora, forçando a entrada de ar atmosférico através do filtro de ar e da válvula de admissão [7], [8], [9], [10], [11]. O ar admitido é empurrado através dos fusos macho e fêmea para a janela de descarga localizada na carcaça da unidade compressora. O ar misturado com o óleo entra no reservatório ar/óleo onde é centrifugado, fazendo que parte do óleo se deposite no fundo do reservatório em função de sua densidade. Após esse processo o ar comprimido flui para o elemento separador e retira do ar o óleo que ainda permaneceu após o processo de centrifugação. O ar puro é então encaminhado para o radiador de ar para então ser resfriado e disponibilizado na descarga do compressor de parafuso.

Quando o gás é comprimido, o volume diminui e verifica-se um aumento da temperatura e da pressão. O gás então passa por uma transformação termodinâmica, pois pelo menos duas variáveis que representavam o estado inicial deste gás foram alteradas. Algumas dessas transformações termodinâmicas são fundamentais para os compressores, podendo ser isotérmica, isobárica, isovolumétrica, adiabática ou politrópica, e determinam um maior ou menor trabalho necessário de compressão do gás [5]. O conhecimento das reais condições do balanço energético característico dos sistemas de ar comprimido pode contribuir muito para identificar as perdas que reduzem a eficiência do sistema para fornecer um ponto de partida para identificação de oportunidade e de seleção e implementação de ações de melhorias [12]. Sabe-se que os vazamentos de ar são uma das maiores perdas. Os sistemas de ar comprimido

das grandes indústrias estão sujeitos a vazamentos e que são comuns perdas de até 40% ou mais de todo o ar comprimido produzido [13], [14]. Portanto, identificar, eliminar ou reduzir os vazamentos de ar comprimido, não apenas na rede de tubulações, como também nos equipamentos consumidores, é um dos modos mais simples de eficientemente economizar energia.

O acionamento e o controle inteligente dos compressores de ar levará a um funcionamento otimizado com relação ao consumo de energia da instalação [10], [11]. Isso é conseguido com o uso de gerenciadores que apresentam várias lógicas de operação que podem ser alteradas automaticamente de modo temporizado ou com base em eventos específicos (uma sequência particular a ser obedecida para manter a pressão solicitada pela pré programação). Com a implantação do sistema de gerenciamento dos compressores pode-se ter um ganho de EE, devido à redução da banda de pressão do sistema de ar da empresa. Além disso, com o gerenciador sentindo a pouca demanda no processo produtivo, quando o compressor entrar em alívio desativa por completo o seu funcionamento. Isto elimina o consumo de EE do compressor sem gerar ar comprimido, diferente de sistemas convencionais sem gerenciador, nos quais o compressor em alívio consome de 20 a 30% de seu consumo em carga.

Ao iniciar qualquer tipo de projeto em relação a um sistema de ar comprimido, é recomendado adotar já na planta medidas para alcançar uma eficiência energética satisfatória. Assim, para que um plano de melhoria de eficiência possa ser levantado é importante a verificação de alguns pontos importantes na rede de ar comprimido [12]. O ar comprimido ao ser produzido se aquece, sendo normalmente o calor retirado para o exterior por resfriamento, usando ar ou água. O calor extraído do compressor pode também ser aproveitado para aquecimento de água, por exemplo [3], [15]. Para os compressores de parafuso pode-se usar diretamente o ar de resfriamento, que através de dutos é transportado para trocadores de calor aquecendo a água. Outro fator importante que reflete em ganho para o sistema de compressão é a baixa temperatura na captação do compressor. O ar à baixa temperatura é mais denso, sendo maior a massa de ar que poderá ser aspirada pelo compressor para uma mesma vazão volumétrica aspirada e mesma potência consumida [3]. Segundo Rocha e Monteiro [12], os compressores consomem cerca de 3,8% de EE a mais com ar a 32°C do que a 21°C. É importante também ressaltar o efeito das perdas de carga e dos vazamentos que obrigam o sistema de ar comprimido trabalhar em uma pressão superior ao que deveria, conduzindo a um aumento do consumo de EE [14]. As perdas de carga são oriundas do atrito do ar em movimento com as rugosidades da tubulação e conexões. Com o aumento da vazão a perda de carga também aumenta, a qual é função inversa do diâmetro da tubulação elevado à quinta potência. Componentes importantes da instalação (elementos filtrantes, trocadores de calor e secadores) contribuem para o aumento das perdas de carga.

Neste trabalho é avaliada a implementação de melhorias em uma instalação de geração de ar comprimido de uma empresa encarregadora de ônibus. Visando aumentar a eficiência energética dessa instalação, avalia-se, sobretudo, a implementação de sistemas gerenciadores dos compressores. Também é avaliada a implantação de um plano de manutenção

para reduzir os vazamentos de ar e ainda, o aproveitamento do calor gerado no resfriamento dos compressores. O estudo é acompanhado de análise econômica, determinando-se o tempo de retorno dos investimentos realizados.

## II. MATERIAL E MÉTODOS

O sistema de geração de ar comprimido da empresa estudada é composto por 9 compressores, sendo 5 instalados na fábrica principal, 2 instalados na fábrica de poltronas e outros 2 na fábrica de plásticos, sendo todos da marca Atlas Copco. Os equipamentos instalados na fábrica principal são os seguintes: 2 compressores modelos GA 160, 2 modelos GA 807, ambos de velocidade fixa e um GA 180 VSD com velocidade variável; 3 reservatórios de ar comprimido de 4 m<sup>3</sup> cada; e 2 secadores. A fábrica de poltronas é composta por: um secador de ar, um reservatório de ar e por dois compressores modelos GA 807 e GA 1107, não possuindo nenhum tipo de controle automatizado. Já na fábrica de plásticos existem também 4 equipamentos principais: um secador, um reservatório e dois compressores, sendo um do modelo GA 110 e o outro GA 1107. Um fator importante é que existe um significativo potencial de energia térmica dos compressores que pode ser aproveitado, especialmente da fábrica principal.

A fim de avaliar e propor mudanças no sistema atual de compressão de ar da empresa, as principais etapas de atuação deste trabalho são as seguintes:

- Execução do levantamento e análise da vazão volumétrica consumida na situação atual por um período de uma semana por pessoal técnico de empresa terceirizada. Nessa avaliação foi utilizado um analisador de energia conectado aos bornes do motor elétrico de acionamento do compressor, com os dados transferidos a um software (*Measurement Box*), o qual, com base no mapa de desempenho do compressor, converte a medida de potência em vazão volumétrica [litros·s<sup>-1</sup>];
- Execução do levantamento do consumo de EE dos compressores por um período de uma semana, utilizando o analisador de energia da marca Embrasul. Esse levantamento serve de comparação com os dados obtidos pela empresa terceirizada;
- Determinação das medições de velocidade e temperatura do ar de resfriamento dos compressores da fábrica principal junto aos dutos conectados às suas cabines. Para essas medidas foi usado um anemômetro de fio quente portátil, marca Lutron, modelo AM-42044A, range de velocidade de 0,2 a 20 m/s e resolução de 0,1 m/s e medida de temperatura de até 80°C, com resolução de 0,1°C. Essas medições são necessárias para se efetuar o estudo do reaproveitamento de energia térmica dos compressores;
- Identificação e instalação do gerenciador de operação dos compressores;
- Elaboração do plano de manutenção do sistema de ar comprimido para minimizar os vazamentos;
- Identificação do tempo de retorno de investimento.

## III. LEVANTAMENTO DOS DADOS

O levantamento de dados realizado e cedido pela empresa terceirizada apresenta um resumo de uma semana de trabalho na empresa, totalizando 168 horas de análise, sendo

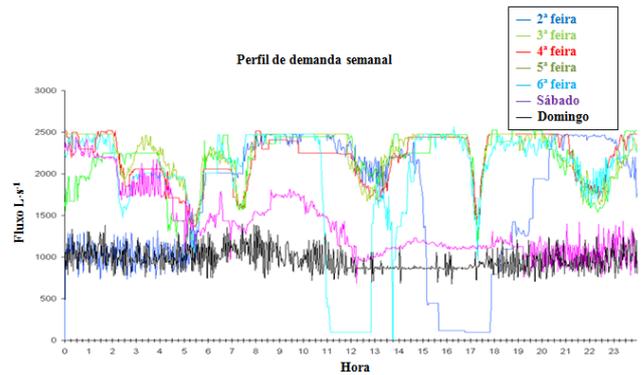


Fig. 1: Medidas de vazão no período de uma semana. (Fonte: adaptado da empresa terceirizada, 2011)

apresentado o consumo dos compressores em carga, alívio e parado. Após foi realizada a multiplicação das horas em cada período pelos dados de potência em carga e potência em alívio dos compressores fornecidos pelo fabricante. Isso gerou um consumo total de EE de 141.465 kWh dos compressores no período, consumo que multiplicado pela tarifa de EE atualmente paga pela empresa de R\$0,32, gera um total de R\$45.268,80. A Figura 1 ilustra o perfil de vazão do sistema de ar comprimido no período especificado e cedido pela empresa terceirizada. Observa-se na Figura 1 que as medições feitas no domingo (linha em preto) – produção parada, foi obtida uma média de demanda de 1000 Ls<sup>-1</sup> de vazão de ar, concluindo-se que são perdas por vazamento na rede de ar.

Em outra análise de consumo dos compressores, utilizando um analisador de energia da marca Embrasul, obteve-se os dados apresentados na Tabela I, sendo o total da EE consumida diferente 7,6% menor daquela obtida pela empresa terceirizada. Isso dá uma confiabilidade maior nos resultados obtidos, proporcionando segurança nas ações de melhorias a serem executadas no processo atual.

Além dos resultados obtidos pela empresa terceirizada, foi realizada em dois domingos, dia que a empresa está completamente parada, uma avaliação minuciosa de vazamentos em toda a rede de ar comprimido. A análise iniciou com todos os compressores desligados e teve a seguinte seqüência de passos:

- Ligar compressor (1) GA 180 VSD, o qual entra em alívio a 7,2 bar;
- Ligar compressor (2) GA 160, que entra em alívio também a 7,2 bar;
- Ligar compressor (3) GA 160, o qual entra alívio a 6,5 bar e em carga a 4,5 bar;
- Aguardar que o compressor (3) entre em alívio e cronometrar o tempo do período;
- Aguardar que o compressor (3) entre em carga e cronometrar o tempo do período;
- Cronometrar os tempos de pelo menos 10 ciclos de carga-alívio e considerar os tempos médios de carga e de alívio;
- Utilizar a Eq. (1) para estimar os vazamentos [13],

$$\dot{V}_{\text{vaz}} = \dot{V}_{\text{comp}} \frac{t_c}{t_{ca}} \quad (1)$$

onde  $\dot{V}_{\text{vaz}}$  é a vazão de vazamentos [Ls<sup>-1</sup>],  $\dot{V}_{\text{comp}}$  é a vazão nominal do compressor [Ls<sup>-1</sup>],  $t_c$  é o tempo em carga [s] e  $t_{ca}$  é o tempo de carga e alívio [s].

TABELA I: Consumo de energia elétrica (kWh) de cada compressor

Dados	Fábrica Principal					Fáb. Plásticos		Fáb. Poltronas	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Compressor	GA 180 VSD	GA 807	GA 807	GA 160	GA 160	GA 1107	GA 110	GA 1107	GA 807
2ª feira	4.043	374	2.056	3.800	3.550	1.599	599	1.734	2.078
3ª feira	3.856	300	2.500	4.031	4.121	1.892	707	1.940	2.390
4ª feira	4.021	292	2.343	4.006	4.079	1.902	709	1.856	2.306
5ª feira	4.299	290	2.245	3.991	3.731	1.824	690	1.987	2.343
6ª feira	4.194	308	2.307	4.010	4.068	1.901	730	1.923	2.356
Sábado	1.893	228	1.900	3.995	4.347	351	510	732	1.850
Domingo	1.673	221	702	1.800	1.900	892	50	459	874
<b>Total (kWh):</b>	<b>23.979</b>	<b>2.013</b>	<b>14.053</b>	<b>25.633</b>	<b>25.796</b>	<b>10.361</b>	<b>3.995</b>	<b>10.631</b>	<b>14.197</b>
<b>Total Geral (kWh):</b>	<b>130.658</b>								
<b>Total R\$ (R\$ 0,32):</b>	<b>41.810,00</b>								

Durante todo o período de teste, os compressores (1) e (2) permaneceram sempre em carga e somente o compressor (3) teve períodos de carga e alívio. Os tempos de funcionamento do compressor (3) em carga e alívio foram medidos com um cronômetro digital marca Casio, modelo HS-3, sendo a média dos tempos cronometrados de 310 s para os períodos de carga e 631 s para os períodos de alívio.

Com o dado de vazão nominal do compressor (3), que é de  $467 \text{ L s}^{-1}$ , foram calculados os vazamentos pela Eq. (1), encontrando-se o valor de aproximadamente  $154 \text{ L s}^{-1}$ . Esse valor somado às vazões nominais dos compressores (1) e (2), respectivamente,  $467 \text{ L s}^{-1}$  e  $478 \text{ L s}^{-1}$ , que permaneceram sempre em carga, totalizou o vazamento de  $1.099 \text{ L s}^{-1}$ .

Pode-se dizer que, os vazamentos quantificados correspondem à utilização da vazão de até dois compressores modelo GA160. Os compressores juntos possuem uma potência de 320 kW, que multiplicada pelas 24 horas diárias e pelos sete dias da semana se obtém o valor de 53.760 kWh, representando cerca de 41% da energia consumida nos 7 dias demonstrados na Tabela I.

Para fins de aproveitamento do calor gerado no ar de resfriamento dos compressores, em particular, da fábrica principal, foram realizadas medições de velocidade e temperatura do ar nos dutos de saída das cabines dos cinco compressores. Como não se tinha disponível o dado de vazão dos ventiladores do sistema de resfriamento dos compressores, se estimou a vazão de ar pelo produto da área transversal do duto de saída das cabines pela velocidade do ar. Os valores encontrados são os seguintes: área transversal do duto ( $1,7 \text{ m} \times 0,63 \text{ m}$ ) igual a  $1,07 \text{ m}^2$ ; velocidade do ar variável de  $4,7 \text{ ms}^{-1}$  a  $5,1 \text{ ms}^{-1}$ , considerando-se uma velocidade média de  $4,9 \text{ ms}^{-1}$ , indicando uma vazão média de ar de resfriamento para cada compressor de  $5,24 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ . A temperatura média do ar nos dutos de saída ficou em torno de  $62,2 \text{ }^\circ\text{C}$  para uma temperatura ambiente de  $19,2 \text{ }^\circ\text{C}$ .

#### IV. SISTEMAS PROPOSTOS E RESULTADOS OBTIDOS

Na sequência são descritos e apresentados os resultados obtidos ou esperados de três sistemas propostos: sistema gerenciador de funcionamento dos compressores, aproveitamento do calor residual gerado com o resfriamento dos compressores e plano de manutenção para manter sob controle os vazamentos de ar comprimido.

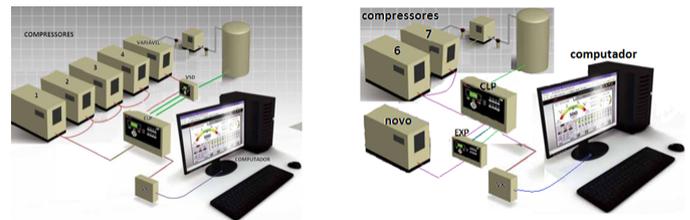


Fig. 2: Sistema de gerenciamento da sala principal e da sala poltronas/plásticos. (Fonte: Ingersoll Rand, 2010)

##### A. Sistema gerenciador de compressão

Para se tratar o modo de operação dos compressores da empresa estudada sugeriu-se a implantação de um sistema gerenciador de acionamentos dos compressores. O sistema gerenciador consiste de um sistema integrado de CLP's que acionam os compressores conforme demanda solicitada durante os dias de produção através de leituras de transdutores de pressão instalados ao longo da rede de ar. O controlador pode gerenciar até 10 compressores de ar, incluindo aqueles de diferentes capacidades e modelos (com velocidade variável e fixa). Como as salas de máquinas da empresa ficam distantes umas das outras, foi proposto a instalação de dois sistemas gerenciadores, um para a sala principal e outro para as outras duas salas.

O sistema instalado na sala principal tem o controlador X12I da (IR) Ingersoll Rand (CLP), que é o responsável pela lógica de programação e sequências de acionamento dos compressores. Também faz parte do sistema de gerenciamento a caixa VSD que é utilizada para as empresas que trabalham com compressores de velocidade variável, que é o caso desse trabalho. Já a caixa VX é utilizada para converter sinais para conexão com o computador. A Figura 2 ilustra o sistema instalado.

O sistema instalado nas salas de poltronas e plásticos consiste em mais um X12I da Ingersoll Rand, uma caixa VSD, uma caixa VS e uma caixa EXP que é utilizada quando os compressores estão fisicamente longe uns dos outros. Observa-se na Figura 2 um compressor novo, o qual é de velocidade fixa, modelo GA 160, substituindo dois compressores que estavam em más condições de funcionamento: o GA 807 e o GA 1107. Os compressores substituídos juntos somavam uma potência de 221 kW, sendo que compressor novo tem uma potência em carga de 160 kW, dando uma economia de 61 kW (27,6% para menos), em contra partida perdeu-se em



Fig. 3: Tela de visualização e componentes do sistema de gerenciamento

TABELA II: Investimentos com os gerenciadores e compressor GA 160

Quant.	Equipamento/componente	R\$
1	Compressor de velocidade fixa GA 160	129.505,00
2	Controlador X 12i	40.720,00
2	Kit IRP CB (4 unidades)	6.200,00
1	VSD MA (GA 180 VSD)	12.000,00
1	EX	7.780,00
2	Visualizador do sistema VX	20.000,00
1	Kit de controle de velocidade e carga VSD	1.300,00
1	Mão de obra de instalação mecânica do compressor	10.000,00
1	Mão de obra de instalação elétrica do compressor	10.000,00
1	Mão de obra de instalação dos gerenciadores	9.000,00
<b>Total:</b>		<b>246.505,00</b>

vazão  $67 \text{ L s}^{-1}$ , ou seja, em torno de 14%. De forma geral estas informações validam a proposta de troca dos compressores da sala de poltronas.

O sistema gerenciador proporcionou uma redução no consumo de EE, pois tem sequências lógicas de acionamento levando em consideração a demanda da empresa, desativando por completo alguns compressores quando não houver demanda suficiente e diminuindo seu funcionamento em alívio. A Figura 3 ilustra a tela de visualização do software supervisor, o qual pode ser acessado de qualquer computador interligado a rede da empresa, podendo dele ser gerados relatórios detalhados em tempo real, diários ou semanais de consumo de EE, nos quais podem ser identificados os valores máximos, mínimos e médios do período analisado.

O software permite também traçar o gráfico de vazão, também em tempo real, diário ou semanal. Esta informação servirá como indicador de vazamentos que será utilizado no plano de manutenção que será tratado mais adiante. Além disso, o sistema demonstra mais alguns gráficos úteis que também são gerados pelo software do gerenciador, como por exemplo, o gráfico de eficiência *versus* potência de operação dos equipamentos.

Os valores investidos na aquisição e instalação de dois sistemas gerenciadores, incluindo a compra do compressor novo (GA 160) são mostrados na Tabela II.

Com implantação do sistema de gerenciamento e o novo compressor na rede de ar comprimido da empresa, foi possível reduzir cerca de 11,6% no consumo de EE semanal, ou seja, através do sistema gerenciador pode-se facilmente obter o consumo em qualquer período de tempo desejado. Após a instalação do sistema de gerenciamento e do novo compressor foi feita a seguinte constatação: a média no consumo de EE semanal ficou em torno de 115.500 kWh, sendo que a Tabela III reporta esse valor comparativamente a aquele apresentado na Tabela I, além da economia gerada.

TABELA III: Comparativo de consumo de energia dos processos

	Processo anterior	Processo gerenciado	Diferença
Consumo de EE	130.658 kWh	115.500 kWh	15.158 kWh
Custo com a EE	R\$ 41.810,00	R\$ 36.960,00	R\$ 4.850,00

Com o valor da diferença monetária semanal observa-se que a economia gerada mensalmente com o novo sistema instalado é de R\$19.400,00, com o qual se calcula o tempo de retorno simples do investimento em aproximadamente 12,7 meses [Investimento (R\$246.505,00) ÷ Economia proporcionada (R\$19.400,00)].

### B. Aproveitamento de energia térmica dos compressores

O ar aquecido provindo do resfriamento dos compressores da sala principal pode ser utilizado para aquecer água através de trocadores de calor e ser armazenada em um reservatório térmico para posterior utilização [16], [17]. O trocador de calor escolhido é do tipo serpentina aletada externamente por onde flui o ar de resfriamento dos compressores e serão em número de 5 (5 compressores da sala principal) com dimensões frontais de 1,7 m por 0,63 m (área de face de  $1,07 \text{ m}^2$ ). Para fins de dimensionamento das serpentinas estimaram-se as seguintes temperaturas da água e do ar: da água na entrada e saída dos tubos, respectivamente de  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  e  $55 \text{ }^\circ\text{C}$ ; do ar na entrada e saída, respectivamente de  $62 \text{ }^\circ\text{C}$  (medida) e  $55 \text{ }^\circ\text{C}$ . À vazão de ar encontrada anteriormente de  $5,24 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  foi adotada uma redução de 5% devida a presença da serpentina no duto de saída do ar, portanto, a vazão de ar (Var) considerada é de  $4,98 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ . A taxa de transferência de calor transferida do ar para água é determinada pela Eq. (2), obtida da 1ª Lei da Termodinâmica para o processo em regime permanente, desprezando as variações de energia cinética e potencial através do volume de controle (serpentina – lado do ar) e considerando nulo o trabalho de eixo [18].

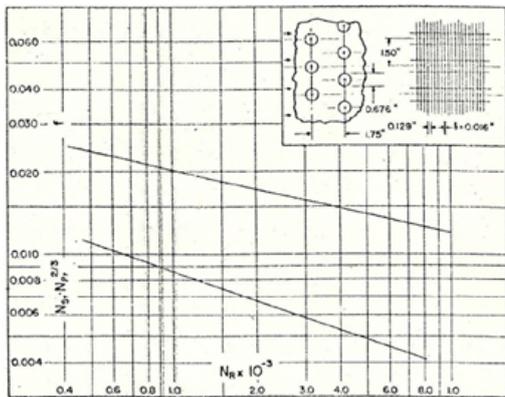
$$\dot{Q}_{\text{ar}} = \rho_{\text{ar}} \dot{V}_{\text{ar}} c_{p,\text{ar}} \Delta T_{\text{ar}} \quad (2)$$

Considerando as seguintes propriedades do ar:  $\rho_{\text{ar}} = 1,2 \text{ kg m}^{-3}$ ;  $c_{p,\text{ar}} = 1,0035 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ; e  $\Delta T_{\text{ar}} = 7 \text{ }^\circ\text{C}$ ; obtém-se da Eq. (2) o valor de aproximadamente 42,0 kW, valor totalmente transferido à água, ou seja, pela Eq. (3), determina-se o fluxo de massa de água necessário, analisando agora o volume de controle em torno da serpentina no lado da água

$$\dot{Q}_{\text{ar}} = \dot{Q}_{\text{água}} = \rho_{\text{água}} \dot{V}_{\text{água}} c_{p,\text{água}} \Delta T_{\text{água}} \quad (3)$$

Assumindo as seguintes propriedades da água:  $\rho_{\text{água}} = 1.000 \text{ kg m}^{-3}$ ;  $c_{p,\text{água}} = 4,19 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ; e  $\Delta T_{\text{água}} = 35 \text{ }^\circ\text{C}$ ; obtém-se da Eq. (3) a vazão água ( $\dot{V}_{\text{água}}$ ) de  $0,000286 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  ou o fluxo de massa da água de  $0,286 \text{ kg s}^{-1}$ .

Para o dimensionamento das serpentinas, além dos valores já mencionados até aqui, foram usados os dados dimensionais e as retas mostrados na Figura 4 extraídos de Kays e London [19]. Na Figura 4 são correlacionados os resultados de transferência de calor em termos do fator de Colburn [( $N^\circ$  de Stanton  $\times$  ( $N^\circ$  de Prandtl) $^{2/3} = N_{\text{St}} N_{\text{Pr}}^{2/3}$ )] e o número de Reynolds ( $N_R$ ), baseados na máxima velocidade mássica [20]. Da Figura 4 também se extrai o fator de atrito ( $f$ ) para



Diâmetro externo do tubo = 17,145 mm (0,676 pol.)  
 Aletas por metro = 305 (aletas por pol. = 7,75)  
 Diâmetro hidráulico,  $4r_h = 3,475$  mm (0,1114 pés)  
 Espessura da aleta = 0,4064 mm (0,016 pol.)  
 Área de fluxo livre/Área frontal,  $\sigma = 0,481$   
 Área de transferência de calor/Volume total,  $\alpha = 554,46$  m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup> (169 pés<sup>2</sup>/pés<sup>3</sup>)  
 Área da aleta/Área total = 0,950  
 OBS.: a área mínima de fluxo livre refere-se ao espaço livre transversal ao fluxo.

Fig. 4: Transferência de calor e fator de atrito ( $f$ ) no fluxo através do feixe de tubos cilíndricos com aletas de chapas planas. (Fonte: adaptado de [19])

calcular a queda de pressão relacionada ao escoamento através do banco de tubos aletados.

Portanto, com base nos dados disponíveis e no procedimento adotado (Figura 4), as 5 serpentinas apresentam as seguintes características principais: área de face  $\cong 1,04$  m<sup>2</sup>; diâmetro interno  $\times$  diâmetro externo dos tubos = 15,17 mm  $\times$  17,17 mm; N<sup>o</sup> de filas de tubos = 2; N<sup>o</sup> de tubos por filas = 16; passo transversal = 38,1 mm; passo longitudinal = 44,45 mm; N<sup>o</sup> de aletas  $\cong 520$ ; espessura da aleta  $\cong 0,4$  mm; produto  $UA \cong 2.530$  WK<sup>-1</sup>; e  $\Delta p_{ar} \cong 8$  mm de coluna de água.

Atualmente o setor de pré-montagem da empresa utiliza duas estufas pequenas aquecidas por 8 lâmpadas de 250 W cada e duas aquecidas por 12 resistências elétricas de 500 W cada, chegando a uma temperatura de 40 °C, tendo um consumo de energia diário de 384 kWh [(2  $\times$  8  $\times$  0,25 kW + 2  $\times$  12  $\times$  0,5 kW)  $\times$  24h], ou seja, mensalmente as estufas geram um consumo de EE de 11.520 kWh (384 kWh dia  $\times$  30 dias). Como sugestão, com a água aquecida do sistema de aproveitamento de calor será possível fazer o aquecimento de uma nova estufa de peças do setor de pré-montagem. A estufa utilizará a água quente direto de um reservatório passando por uma serpentina interna a estufa, que fará o aquecimento. A Figura 5 ilustra essa instalação, onde se identifica a sala principal de compressores com o sistema de aproveitamento de calor do ar de resfriamento das cabines interligado ao reservatório de água quente (à direita da sala) e esse ligado à estufa nova do setor de pré-montagem.

Como setor de pré-montagem está distante cerca de 60 m da sala principal de compressores, isto requer que os tubos que interligam o reservatório de água quente à nova estufa tenham que ser isolados termicamente para que a água quente escoe entre os equipamentos com a menor perda de calor possível.

Outra sugestão para o uso da água quente será para o aquecimento de guarnições de borracha das janelas dos ônibus até uma temperatura ao redor de 40 °C. O aquecimento das guarnições é feito em uma estufa que emprega duas

TABELA IV: Investimentos com o sistema de aproveitamento de energia térmica

Quant.	Equipamentos	Custo (R\$)
5	Serpentinas com tubos de inox e aletas em chapa galvanizada	50.000,00
1	Reservatório térmico em aço carbono isolado termicamente	6.247,00
6	Bombas centrífugas	3.384,00
150 m	Tubos de aço galvanizado de diâmetro 1 pol + isolamento	2.100,00
1	Mão de obra	3.000,00
Total:		64.731,00

resistências elétricas de 1.500 W, que funcionam em média 4 horas diárias, consumindo 360 kWh mensais (4h  $\times$  30 dias  $\times$  3 kW).

Os principais equipamentos utilizados no sistema de aproveitamento do calor das cabines de compressores da sala principal foram orçados e os valores são apresentados na Tabela IV.

Com os valores de EE consumidos nas estufas do setor de pré-montagem e de aquecimento das guarnições (11.520 + 360 = 11.880 kWh) e com o valor da tarifa de R\$0,32, se teria uma economia de energia de R\$ 3.801,60 por mês, desativando o sistema de aquecimento elétrico. Portanto, dividindo o valor total dos investimentos no sistema de aproveitamento do calor pela economia gerada se terá um tempo de retorno simples do investimento em aproximadamente 17 meses.

### C. Plano de manutenção dos vazamentos

A manutenção e o reparo dos sistemas de ar comprimido costumam ser simplesmente menosprezados. Hoje, manter o sistema operacional com máxima eficiência exige conhecimento total da tecnologia, investimento no monitoramento dos equipamentos e capacitação contínua. Esses são os custos com os quais muitas empresas industriais, até mesmo as maiores, não possuem controle.

Um plano de manutenção foi implantado na empresa, que prevê em primeira instância a realização de inspeções periódicas semanais do sistema de ar comprimido. As inspeções são realizadas por um representante de cada setor de fabricação e um responsável da manutenção. Foi adotado o uso de marcadores (fitas, adesivos etc.) afixados nos pontos de vazamentos detectados para auxiliar os técnicos que efetuarão posterior correção.

O método mais simples e confiável de detectar os vazamentos menores, embora demande muito tempo, é a aplicação de espuma com pincel sobre as áreas suspeitas. Apesar dos vazamentos aparecerem em qualquer parte do sistema de ar comprimido, os componentes mais propícios são: juntas, mangueiras, tubos e conexões; engates rápidos; filtros e reguladores de linha; drenos de condensados; conexões de tubos; válvulas de controle; ferramentas pneumáticas (falta de ou problemas de manutenção em ferramentas podem gerar vazamentos internos); flanges; pontos de uso desativados, mas ainda interligados a rede principal; etc.

Os técnicos envolvidos no plano de manutenção atuaram em diferentes setores da fábrica como pintura, estrutura e acabamento e, com a implantação do plano na empresa estudada, houve no ano de 2012 a redução de quase a metade dos

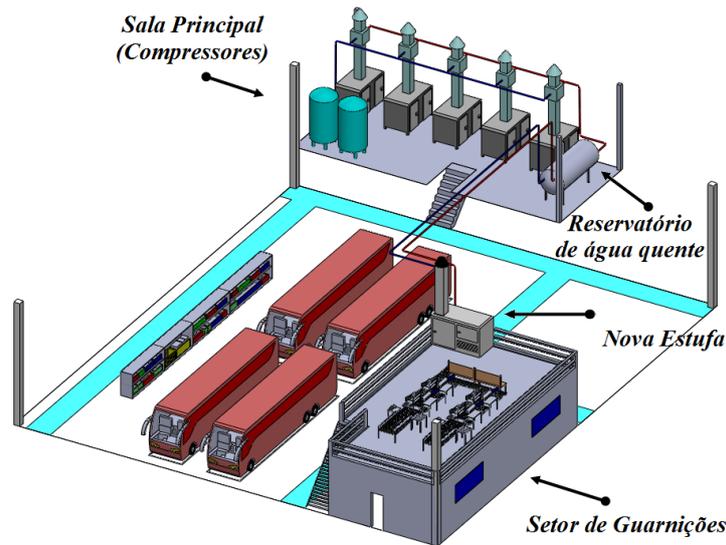


Fig. 5: Sugestão de recuperação de energia térmica

vazamentos de ar. Isso gerou uma economia anual em torno de R\$412.876,00 [ $53.760 \text{ kWh/semana} \times 4 \times 12 \times \text{R}\$0,32 \times 0,5$ ]. Para o desenvolvimento do plano de manutenção descrito houve um custo mensal para a empresa em torno de R\$1.800,00, levando em conta valores de mão de obra dos técnicos envolvidos e dos materiais necessários para a execução dos reparos. Ou seja, o custo anual com o plano de manutenção foi de R\$21.600,00.

Para se conseguir a disseminação dos conceitos, cuidados e da importância de manter todo o aparato pneumático em boas condições de utilização nas linhas de produção, deve-se utilizar treinamentos de conscientização atingindo todos os níveis hierárquicos da produção.

## V. CONCLUSÕES

Como pretendido inicialmente, esse trabalho buscou avaliar o funcionamento da operação dos compressores e instalar um sistema de gerenciamento dos mesmos reduzindo o consumo de energia. Na intenção de obter esses resultados, foram realizados importantes levantamentos das condições atuais de todo processo de ar comprimido da empresa.

No cenário atual de escassez dos recursos naturais, a pesquisa e a execução de projetos visando um melhor emprego da energia elétrica, comprovam que o uso racional pode cooperar com a preservação. A redução do consumo de energia já é um fator que além de benefícios ao meio ambiente, também se apresenta com bons olhos a saúde financeira da empresa.

A compra de novos equipamentos como compressor e o gerenciador de compressores, necessários para a montagem do novo sistema de ar comprimido da empresa avaliada e a proposta de aproveitamento da energia térmica produzida no resfriamento dos compressores, mostrou-se necessário após a análise dos dados de consumo de energia e da forma de funcionamento dos mesmos que apresentavam uma lógica de funcionamento não adequada.

Com a meta alcançada nesse trabalho de redução de 60.600 kWh mensais no consumo de EE proporcionada, sobretudo pela instalação dos gerenciadores de operação dos compressores, conduzindo a uma economia mensal de energia de

R\$19.400,00 na fatura de energia elétrica, torna-se evidente que as grandes e pequenas empresas têm que ter um controle mais apurado de seus gastos com o sistema de ar comprimido. A isto corrobora o tempo razoável de retorno do capital investido, que no caso foi 13 meses.

Como sugestão fica a proposta para que os departamentos de manutenção das empresas juntamente com o pessoal de produção tenham uma maior preocupação com o funcionamento dos sistemas de compressão de ar industriais a fim de minimizar as perdas de pressão na rede ocasionadas especialmente pelos vazamentos de ar. Isto, certamente permitirá que a rede opere com menor pressão de trabalho, reduzindo, de consequência, o consumo de energia elétrica nos compressores.

## VI. BIBLIOGRAFIA

- [1] EPE, “Empresa de pesquisa energética,” <http://www.epe.gov.br>, fev. 2011.
- [2] C. Dyer, G.P. Hammond, C.I. Jones, and R.C. McKenna, “Enabling technologies for industrial energy demand management,” *Energy Policy*, vol. 36, pp. 4434–4443, 2008.
- [3] A. Hingorani, “Energy efficiency in compressed air systems,” *International Conference eemods '09: Energy Efficiency in Motor Driven Systems*, vol. 2, pp. 655–664, Sept 2009.
- [4] R. Saidur, N.A. Rahim, and M. Hasanuzzaman, “A review on compressed-air energy use and energy savings,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, pp. 1135–1153, 2010.
- [5] Procel Educação, Ed., *Conservação de Energia - Eficiência Energética de Equipamentos e Instalações*, Universidade Federal de Itajubá/Eletróbrás – FUPAI, 2006.
- [6] N.A. Madloul, R. Saidur, M.S. Hossain, and N.A. Rahim, “A critical review on energy use and savings in the cement industries,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, pp. 2042–2060, 2011.
- [7] V.P.B. Aguiar, R.S.T. Pontes, A.B. Moreira, C.R.S. Júnior, and C.A.M. de Holanda, “Simulação do potencial de eficiência energética em um sistema de ar comprimido com acionamento a velocidade variável,” *II Congresso Brasileiro de Eficiência Energética – II CBEE*, pp. 1–7, 2007.
- [8] V.P.B. Aguiar, “Estudo de eficiência energética no acionamento de um compressor de parafuso em um sistema de ar comprimido,” *Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica*, Fortaleza: Universidade Federal do Ceará, 2008.
- [9] H. Falkner and M. Slade, “Categorising the efficiency of industrial air compressors,” *International Conference eemods '09: Energy Efficiency in Motor Driven Systems*, vol. 2, pp. 651–654, Sept 2009.
- [10] Atlas Copco, “Manual de instruções para compressores estacionários rotativos de parafusos ga 807, ga 160 e ga vsd 180,” São Paulo, 2011.
- [11] H. Wagner, *Compressed Air: Versatile, Reliable and Safe Energy*, Number Technical Article 101. Kaeser Compressors, Inc./Compressed Air and Gas Institute – CAGI, 2013, acesso em 14 ago.

- [12] N.R. Rocha and M.A.G. Monteiro, Eds., *Eficiência Energética em Sistemas de Ar Comprimido - Manual Prático*, Eletrobrás, Procel Indústria Consórcio Efficientia/FUPAI, 2005.
- [13] A. Hahn, *Compressores – Guia Avançado*, Eletrobrás, Procel Indústria, Rio de Janeiro, 2004.
- [14] S. Dudić, I. Ignjatović, D. Šešlija, V. Blagojević, and M. Stojiljković, “Leakage quantification of compressed air using ultrasound and infrared thermography,” *Measurement*, vol. 45, pp. 1689–1694, 2012.
- [15] E. Ruppelt and M. Bahr, “Heat recovery systems,” disponível em: <http://www.kaeser.com>, acesso em 16 mai. 2011.
- [16] J.S. Júnior and E.G. Peixoto, “Eficiência energética em sistemas de ar comprimido recuperação de calor da compressão,” Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Industrial Mecânica, Salvador: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia, 2010.
- [17] Procel Educação, Ed., *Eficiência Energética – Teoria e Prática*, Universidade Federal de Itajubá/Eletrobrás – FUPAI, 2007.
- [18] C. Borgnakke and R.E. Sonntag, *Fundamentos da Termodinâmica*, Edgard Blücher, São Paulo, 7 edition, 2009.
- [19] W.M. Kays and A.L. London, *Compact Heat Exchangers*, McGraw Hill, New York, 2 edition, 1984.
- [20] F.P. Incropera and D.P. De Witt, *Fundamentos da Transferência de Calor e de Massa*, LTC, Rio de Janeiro, 2003.



**Carlos Roberto Altafina** possui graduação em Engenharia Operacional Habilitação Máquinas pela Universidade de Caxias do Sul (1975), mestrado em Engenharia Mecânica - Termodinâmica pela Universidade Federal de Santa Catarina (1980) e doutorado em Energética - Università degli Studi di Padova (1998). Atualmente é professor titular da Universidade de Caxias do Sul. Tem experiência na área de Engenharia Mecânica, com ênfase em sistemas térmicos e energia, atuando principalmente nos seguintes temas: simulação de sistemas de conversão de energia, análise de processos de combustão e de gaseificação e aplicação de combustíveis fósseis e renováveis em equipamentos térmicos.



**Claudir Pereira Nunes** possui graduação em Engenharia Mecânica pela Universidade de Caxias do Sul (2011). Atualmente é Analista de Assistência Técnica mercado externo e interno da empresa Marcopolo. Tem experiência na área de treinamento técnico de carrocerias de ônibus.