

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA  
CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NA INDÚSTRIA**

**HARDING DUCCI OLESKO**

**UMA PROPOSTA DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA PARA SISTEMAS  
DE AR COMPRIMIDO INDUSTRIAIS**

**MONOGRAFIA DE ESPECIALIZAÇÃO**

**CURITIBA**

**2013**

**HARDING DUCCI OLESKO**

**UMA PROPOSTA DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA PARA SISTEMAS  
DE AR COMPRIMIDO INDUSTRIAIS**

Monografia apresentada como requisito parcial à obtenção do título de Especialista em Eficiência Energética, do Departamento de Eletrotécnica, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. M.Eng. Ayres Francisco da Silva Sória

**CURITIBA**

**2013**

## **TERMO DE APROVAÇÃO**

### **UMA PROPOSTA DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA PARA SISTEMAS DE AR COMPRIMIDO INDUSTRIAIS**

**HARDING DUCCI OLESKO**

Esta Monografia foi apresentada em 08 de Junho de 2013 como requisito parcial para a obtenção do título de Especialista em Eficiência Energética. O(a) candidato(a) foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Ayres Francisco da Silva Sória  
Prof.(a) Orientador(a)

Luiz Amilton Peplow  
Eng. Eletricista e de Segurança - UTFPR

Roberto Cesar Betini  
Prof. Dr. Eng.

Fábio Antonio Filipini  
Prof. M. Eng.

- O Termo de Aprovação assinado encontra-se na Coordenação do Curso -

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço ao meu pai (in memoriam) e minha mãe que com certeza estão orgulhosos de mim neste momento.

Agradeço a minha esposa Juliana, pela compreensão apresentada durante a minha ausência em função das horas de dedicação a este estudo.

Agradeço ao meu professor e orientador, Prof. M.Eng. Ayres Francisco da Silva Sória pela oportunidade a mim concedida de receber tão valiosas orientações e conhecimentos, que serão de fundamental importância em minha vida profissional.

Agradeço a todos os meus amigos de sala de aula da especialização, que me ensinaram muito durante as aulas.

Agradeço a todos os professores deste colegiado, que me concederam a oportunidade única de desenvolvimento profissional e pessoal, em especial ao professor Fábio Antonio Filipini que muito me auxiliou nas técnicas de Medição e Verificação, assim como o MTR para comprovação dos resultados deste trabalho.

## RESUMO

Este trabalho tem o intuito de demonstrar, o potencial de economia de energia elétrica em uma indústria, com ar comprimido, analisando as reais possibilidades de redução dos desperdícios de energia na geração e distribuição, assim como a conscientização da utilização correta do ar comprimido.

É apresentada a potencial economia na Geração do ar comprimido, que consiste na correta manutenção e regulagem dos compressores.

Na parte de distribuição é mostrado o correto dimensionamento da rede de ar comprimido, o seu layout e o trabalho de verificação da rede de ar comprimido, que consiste em um trabalho minucioso de detecção de vazamentos com a utilização de equipamentos específicos, medições no sistema onde estão incluídas as medições do ar, levantamento da demanda de ar comprimido da fábrica, verificação da vazão do sistema por meio da medição de vazão dos compressores, com isso é possível traçar o perfil de consumo e realizar as corretas regulagens das máquinas e fazer a correta identificação dos custos de energia e onde economias são possíveis.

É mostrado como deve ser feito o trabalho de detecção de vazamentos, o que possibilita descobrir a quantidade de vazamentos e o quanto este problema corresponde em relação a produção de ar, assim como as ações que devem ser realizadas para diminuir este desperdício.

Outra fase do trabalho consiste na racionalização do uso de compressores, é demonstrado o trabalho de instalação de um novo sistema de controle, e como é possível reduzir a faixa de pressão mínima e máxima da rede de ar comprimido, assim como ajustar automaticamente uma faixa de pressão para horário produtivo e uma faixa de pressão em horário não produtivo (mais baixa), sem afetar a produção.

É realizado também um estudo da necessidade de pressões nas diversas áreas da Fábrica, com este trabalho, é possível reduzir a pressão na geração dos compressores em horários de produção e fora de produção.

E finalmente é levada em consideração a correta utilização final do ar comprimido, que consiste na manutenção correta dos equipamentos de linha e principalmente na educação das pessoas que trabalham nestes postos, pois, nestes postos é onde se encontram a maior parte dos vazamentos da rede de ar comprimido e, portanto a maior fonte dos desperdícios.

**Palavras-chave:** Ar Comprimido. Eficiência Energética. Redução. Geração. Distribuição. Consumo. Vazamentos.

## ABSTRACT

This work aims to demonstrate the potential for power savings in an industry with compressed air, analyzing the real possibilities of reducing energy waste in the generation and distribution, as well as awareness of proper use of compressed air.

It shows the potential savings in generation of the compressed air, which is the correct adjustment and maintenance of compressors.

On the distribution is shown the correct sizing of compressed air, its layout and verification work of the compressed air network, which consists of a thorough leak detection with the use of specific equipment, system measurements which are included measurements of air, raising the demand for compressed air plant, check the flow of the system by measuring flow compressors, it is possible to trace the consumption profile and perform the correct settings of the machines and make the correct identification energy costs and where savings are possible.

It is shown how the work should be done to detect leaks, which allows to discover the amount of leaks and how this problem corresponds regarding air production, as well as the actions that must be performed to reduce this waste.

Another phase of the work consists in the rational use of compressors, is shown the work of installing a new control system, and how we can reduce the range of minimum and maximum pressure of the compressed air system as well as automatically adjust a range of productive and time pressure to a pressure in non-productive time (lower), without affecting production.

It also conducted a study of the need for pressures in various areas of the factory, with this work, it is possible to reduce the pressure in the generation of compressors in production schedules and out of production.

Finally is taken into consideration the right end use of compressed air, which is to maintain the correct line equipment and especially in the education of persons working in these positions, because in these positions is where most leakage network Compressed air and therefore the major source of waste.

**Keywords:** Compressed Air. Energy Efficiency. Reduction. Generation. Distribution. Consumption. Leaks.

## LISTA DE SÍMBOLOS E UNIDADES

%	Percentual
bar	bar
CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono
F	Força
g/m <sup>3</sup>	Gramas por metro cúbico
GLP	Gás liquefeito de petróleo
GN	Gás natural
h	Hora
Hz	Frequência
i	Taxa de juros
J	Joule
kW	Quilo Watt
kWh	Quilo Watt hora
l/s	Litros por segundo
m/s	Metros por segundo
m <sup>2</sup>	Metro quadrado
m <sup>3</sup>	Metro cúbico
m <sup>3</sup> /min	Metro cúbico por minuto
m <sup>3</sup> /s	Metro cúbico por segundo
mbar	Milibar
mg/m <sup>3</sup>	Miligrama por metro cúbico
min	Minutos
MW	Mega Watt
MWh	Mega Watt hora
n	Vida útil
N	Newton
n <sup>o</sup>	Número
°C	Graus Celsius
°K	Grau Kelvin
P	Potência
ppm	Parte por milhão
R\$	Real

s	Segundo
tep	Tonelada equivalente de petróleo
v	Velocidade
V	Volts
V	Volume
$\mu\text{m}$	Micro metro
$\Sigma$	Somatório

## LISTA DE ABREVIATURAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
Art.	Artigo
CAS	Complexo Ayrton Senna
CED	Custo Evitado de Demanda
CEE	Custo Evitado de Energia
COPEL	Companhia Paranaense de Energia
CPE	Custo Anualizado dos Equipamentos
EE	Energia Economizada
FRC	Fator de Recuperação de Capital
GA	Compressor Lubrificado
IEA	International Energy Agency
ONU	Organização das Nações Unidas
RCB	Relação Custo Benefício
RDB	Renault do Brasil
RDP	Redução de Demanda na Ponta
RI	Retorno de Investimento
UNCED	United Nations Conference on Environment and Development (Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento)
UNDP	United Nation Development Programme (Programa de desenvolvimento das Nações Unidas)
UNEP	United Nation Environment Programme (Programa Ambiental das Nações Unidas)
ZR-750	Compressor Isento de Óleo de Velocidade Fixa de 750 kW
ZR-900 VSD	Compressor isento de Óleo de Velocidade Variável de 900 kW
CVP	Fábrica de Veículos de Passeio
CVU	Fábrica de Veículos Utilitários
CMO	Fábrica de Motores

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	12
1.1	JUSTIFICATIVA .....	14
1.2	OBJETIVOS .....	16
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO .....	17
1.4	CRONOGRAMA .....	19
2	METODOLOGIA: SISTEMAS DE AR COMPRIMIDO INDUSTRIAIS .....	20
2.1	COMPOSIÇÃO DO AR ATMOSFÉRICO .....	20
2.2	CONCEITOS BÁSICOS DO AR COMPRIMIDO .....	21
2.3	TIPOS DE COMPRESSORES .....	28
2.3.1	Compressores Dinâmicos .....	29
2.3.1.1	Compressores centrífugos ou radiais .....	29
2.3.1.2	Compressores axiais .....	30
2.3.2	Compressores por Deslocamento .....	31
2.3.2.1	Compressores alternativos .....	31
2.3.2.2	Compressores rotativos .....	32
2.3.2.2.1	Compressor do tipo roots .....	32
2.3.2.2.2	Compressor a palhetas .....	33
2.3.2.2.3	Compressor espiral .....	33
2.3.2.2.4	Compressor a parafuso .....	34
2.3.2.2.5	Compressor de lóbulos .....	36
2.4	SUBSISTEMAS DE AR COMPRIMIDO .....	38
2.4.1	Geração .....	38
2.4.1.1	Sistema descentralizado .....	39
2.4.1.2	Sistema centralizado .....	40
2.4.2	Distribuição .....	41
2.4.2.1	Circuito fechado .....	42
2.4.2.2	Circuito aberto .....	43
2.4.2.3	Componentes da rede de ar .....	44
2.4.2.3.1	Válvulas de fechamento nas linhas de distribuição .....	44
2.4.2.3.2	Reservatório .....	45
2.4.2.3.3	Drenagem do ar comprimido .....	46
2.4.3	Consumo Final .....	48
2.4.3.1	Vazamentos .....	49
2.4.3.2	Queda de pressão do ar comprimido .....	52
3	TRABALHO PROPOSTO: AUDITORIA NA REDE DE AR COMPRIMIDO .....	57
3.1	GERAÇÃO .....	59
3.1.1	Temperatura de Aspiração dos Compressores .....	59
3.1.2	Verificação do Sistema de Manutenção dos Compressores .....	60
3.1.3	Regulagem da Pressão dos Compressores .....	63
3.1.4	Medição de Rendimento dos Compressores .....	64
3.1.5	Medição de Corrente dos Compressores .....	65
3.2	DISTRIBUIÇÃO .....	66
3.2.1	Verificação da Tubulação .....	66
3.3	CONSUMO FINAL .....	67
3.3.1	Medição de Vazamentos .....	67
3.3.1.1	Medidor ultrassônico .....	68

3.3.1.2	Medida por tempo de carga.....	71
4	ESTUDO DE CASO: RENAULT DO BRASIL .....	73
4.1	RESULTADOS DA VERIFICAÇÃO DO SISTEMA DE AR COMPRIMIDO.....	76
4.2	CONCLUSÕES DA AUDITORIA .....	81
4.3	AÇÕES REALIZADAS NA RENAULT .....	82
4.3.1	Manutenção dos Compressores e Secadores.....	82
4.3.2	Vazamentos.....	82
4.3.3	Gerenciador da Rede de Ar Comprimido .....	84
4.3.4	Redução da Pressão da Rede de Ar Comprimido .....	87
4.4	MEDIÇÃO E VERIFICAÇÃO .....	88
4.4.1	Caracterização da Unidade Consumidora.....	88
4.4.2	Descrição da Medida de Racionalização de Energia (MRE).....	88
4.4.3	Normas e Recomendações Aplicadas no Plano de M & V.....	88
4.4.4	Definições Específicas do Plano de M & V .....	89
4.4.4.1	Limite, fronteira de medição e efeitos interativos.....	89
4.4.5	Grandezas da M & V .....	89
4.4.5.1	Variáveis independentes.....	89
4.4.5.2	Variáveis dependentes.....	89
4.4.5.3	Fatores estáticos .....	89
4.4.6	Opção da M & V.....	90
4.4.6.1	Justificativa da opção da M & V .....	90
4.4.7	Período e Intervalo da M & V .....	90
4.4.8	Medição da Medição e Verificação .....	90
4.4.8.1	Período de referência.....	90
4.4.8.1.1	Pontos de medição antes .....	90
4.4.8.2	Período pós-retrofit .....	90
4.4.8.2.1	Pontos de medição após .....	91
4.4.9	Especificação dos Equipamentos da M & V .....	91
4.4.10	Precisão e Incerteza Esperada.....	91
4.4.11	Preços de Energia.....	91
4.4.12	Ajustes da M & V .....	91
4.4.12.1	Ajuste de rotina .....	91
4.4.12.2	Ajuste de não-rotina .....	92
4.4.13	Responsável pela Execução da M & V.....	92
4.4.14	Metodologia da Medição & Verificação.....	92
4.4.15	Execução da M & V .....	92
4.4.15.1	M & V no período de referência .....	92
4.4.15.2	M & V no período pós-melhoria .....	92
4.4.15.3	Comparativo da M & V e metas da MRE .....	93
4.4.16	Cronograma de M & V .....	93
4.5	MONITORING, TARGETING AND REPORTING - MTR .....	96
5	CONCLUSÃO .....	100
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	102

## 1 INTRODUÇÃO

Atualmente muito tem se falado a respeito de eficiência energética nos processos industriais, mas a grande dúvida dos profissionais nas indústrias é saber em qual sistema se deve começar a trabalhar. Um dos sistemas em que o usuário pode efetivamente possuir o controle total, desde o início em sua geração, passando pela distribuição, o tratamento e definindo sua qualidade até a aplicação final é o sistema de ar comprimido.

Um sistema de ar comprimido dito ideal é aquele em que a geração, a distribuição e o uso final funcionam em harmonia de uma maneira eficiente e qualquer um destes subsistemas não pode ser prejudicado pela má utilização dos outros.

Na geração, os compressores devem estar bem dimensionados e a manutenção das máquinas deve atender às recomendações do fabricante.

Na distribuição, deve ser dada atenção especial ao dimensionamento da rede de ar comprimido, a rede deve possuir a menor queda de pressão possível e os vazamentos devem ser controlados, monitorados e reduzidos sempre que possível.

E finalmente, no uso final, além do controle dos vazamentos, assim como na distribuição, a manutenção dos equipamentos que utilizam o ar é muito importante, mas o fundamental é que as pessoas que o utilizam tenham a consciência de quanto custa a produção deste e como este fluido deve ser utilizado e poupado.

A atenção ao uso do ar comprimido deve ser muito criteriosa e controlada, ainda mais nos dias de hoje que os recursos naturais devem ser cada vez mais preservados e a concorrência nas empresas é cada vez maior.

Para uma análise de eficiência energética em uma planta compressora, é fundamental conhecer características tais como: geração, sistema de distribuição, controle, válvulas de pressão, medição e elementos consumidores. Para isso, faz-se necessária a definição de um perfil de consumo, o qual permita mensurar a demanda necessária e as pressões de entrega nos locais de utilização (*DOE–U.S Department of Energy, 2003*).

Somente por meio de medições confiáveis torna-se possível melhorar parâmetros operacionais tais como: acionamentos de motores, regulação da

velocidade, método de controle, rejeição de calor, sistema de resfriamento e outros (*DOE–U.S Department of Energy, 2003*).

Este trabalho visa de uma forma simples e prática, demonstrar por onde se deve começar uma análise, identificando os principais problemas em um sistema de ar comprimido e, como proceder na correção destes por meio das técnicas e ações descritas no decorrer da literatura.

## 1.1 JUSTIFICATIVA

Compressores são máquinas indispensáveis na maioria dos processos industriais. Estes equipamentos requerem uma atenção especial, em virtude do grande consumo de energia necessário para o seu funcionamento, podendo em alguns casos chegar a representar 40% do custo da energia elétrica de uma instalação. Na maioria das indústrias, seu projeto de instalação é ultrapassado, não há uma autocrítica do sistema buscando melhorias constantes e as condições de operação são somente as necessárias para que a produção de ar seja mantida.

Com todo esse mau gerenciamento, os compressores acabam se tornando grandes vilões no consumo de energia em algumas organizações. Em um mercado cada dia mais competitivo, melhorias de processo são alternativas para vencer concorrências, é necessário, portanto, que se entendam os processos pneumáticos, buscando aprimorá-los, atualizá-los, dando aos mesmos a atenção necessária para evitar um desperdício que no final de cada mês onera o fluxo de caixa de qualquer empresa (Manual de Ar Comprimido e Gases, 2004).

Analisando-se os custos de energia elétrica do Complexo Ayrton Senna (CAS), foi verificado que do consumo total da planta aproximadamente 50 % deste era proveniente da Central de Utilidades, onde possui os seguintes sistemas: água gelada, água quente, água desmineralizada, sistema de tratamento de efluentes, água de resfriamento de solda, água de resfriamento e ar comprimido, e destes 50 %, aproximadamente a metade, provinha do ar comprimido.

Ou seja, em épocas de necessidades de grandes reduções de consumo para atender um mercado cada vez mais competitivo, foi verificada uma grande oportunidade no segmento do ar comprimido para economia de energia.

O gráfico 01 representa as perdas nos sistemas de ar comprimido e, baseando-se no mesmo, foram tomadas as ações de eficiência energética.



Gráfico 01 - Diagrama de perdas comuns em um sistema de ar comprimido  
Fonte: /manual Prático – Eficiência Energética em Sistemas de Ar Comprimido – Eletrobrás / Procel.

De acordo com as leis da termodinâmica, a energia utilizada para compressão do ar, é necessariamente transformada em calor. A maior parte deste calor, mais de 90%, é absorvida pelo próprio ar comprimido e pelo óleo de lubrificação. Um pequeno percentual disto é irradiado para o meio ambiente.

Entretanto, a energia elétrica não é a única fonte de energia que entra no sistema. O ar admitido no sistema contém vapor de água, que contém energia molecular armazenada. Quando o vapor é condensado, esta energia molecular é transferida para o sistema de refrigeração do compressor. Esta quantidade de energia equivale de 5 a 20% do total de energia elétrica. (Fonte: Blogar edição número 13).

Baseado nestas informações e oportunidades foi definido que deveria ser dada uma especial atenção ao sistema de ar comprimido, onde o grande problema são os desperdícios de ar e a baixa eficiência do sistema, com isto o trabalho pretende identificar e utilizar soluções técnicas nas áreas de geração, distribuição e uso final do ar comprimido para tornar o sistema mais eficiente.

## 1.2 OBJETIVOS

### OBJETIVO GERAL

Identificar alternativas para redução de consumo de energia elétrica no sistema de ar comprimido de uma planta industrial, utilizando técnicas de detecção e análises do sistema de ar comprimido em sua geração, distribuição e consumo final, de forma a tornar este mais eficiente.

### OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para atingir o objetivo esperado devem-se atender várias pequenas metas, tais como:

- Adequar o sistema de manutenção dos compressores;
- Realizar a medição de rendimento dos compressores da planta;
- Reduzir a pressão da produção do ar comprimido em horários produtivos e não produtivos;
- Analisar minuciosamente a rede de ar comprimido para verificar potenciais fontes de desperdício;
- Detectar e eliminar vazamentos de ar na rede de ar comprimido;
- Adequar os sistemas de manutenção dos equipamentos de uso final de ar comprimido;
- Adequar a rede de ar comprimido em casos de consumos específicos;

### 1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

#### Capítulo 1 – Introdução

Neste capítulo é demonstrado como deve ser um sistema de ar comprimido dito ideal, desde sua geração, passando pela distribuição e consumo.

##### 1.1 – Justificativa

Na justificativa é demonstrada uma visão geral do problema nas indústrias, e em especial no caso da Renault do Brasil e o porquê trabalhar no sistema de ar comprimido.

##### 1.2 – Objetivos

Neste subcapítulo demonstram-se os objetivos geral e específicos do trabalho para se chegar o mais próximo de um sistema de ar comprimido dito ideal.

##### 1.3 – Estrutura do Trabalho

Nesta parte estão descritos os resumos de cada capítulo.

##### 1.4 - Cronograma

Demonstração do cronograma desde o início dos trabalhos, passando pelas medições e verificações antes e após as melhorias, até a apresentação final desta monografia.

#### Capítulo 2 – Metodologia: Sistemas de Ar Comprimido Industriais

Neste capítulo é demonstrada toda a base teórica para realizar um trabalho e entender como funciona um sistema de ar comprimido industrial. A base teórica consiste em entender a composição do ar atmosférico, os conceitos básicos do ar comprimido, os tipos de compressores e finalmente todos os subsistemas de um

sistema de ar comprimido industrial, que são: a geração, a distribuição e o consumo final.

Neste capítulo pode-se também verificar os problemas mais comuns encontrados nas indústrias relacionados ao sistema de ar comprimido.

### Capítulo 3 – Trabalho Proposto: Auditoria na Rede de Ar Comprimido

Nesta parte do trabalho, o autor propõe uma análise do sistema de ar comprimido através de uma auditoria. Esta auditoria proposta contempla estudos na geração, como: verificação de temperatura de aspiração dos compressores, revisão do sistema de manutenção dos compressores, regulação de pressão dos compressores, verificação do rendimento das máquinas e medições de corrente dos equipamentos. Na parte da distribuição as análises são voltadas para verificação da tubulação e sua queda de pressão e no uso final a medição de vazamentos da rede de ar.

### Capítulo 4 – Estudo de Caso: Renault do Brasil

Neste capítulo é feita uma descrição do sistema de ar comprimido da planta da Renault do Brasil, assim como é demonstrado a aplicação do trabalho proposto e a análise dos resultados.

Na análise é incluído o resultado da verificação do sistema de ar comprimido, as conclusões da auditoria, as ações realizadas na Renault do Brasil e o estudo de medição e verificação compreendido entre 2009 a 2010, assim como o estudo de “monitoring, targeting and reporting” desde 2009 até o ano de 2012.

### Capítulo 5 – Conclusão

Na conclusão são discutidos se os objetivos listados no item 1.2 foram atingidos ou não e quais os benefícios adquiridos.

### Capítulo 6 – Referências Bibliográficas

## 1.4 CRONOGRAMA

Atividades	2009	2010	2011	2012	out/12	nov/12	dez/12	jan/13	fev/13	mar/13	abr/13	mai/13	jun/13
Coleta das medições antes das melhorias	X												
Implementação das melhorias		X											
Coletas das medições após as melhorias		X	X	X									
Levantamento Bibliográfico					X	X	X	X					
Levantamento de dados					X	X	X						
Apresentação da proposta					X								
Redação da Monografia							X	X	X				
Criação da Apresentação											X	X	
Verificação dos dados									X				
Redação Final										X	X		
Apresentação Final													X

Tabela 1 - Cronograma

## 2 METODOLOGIA: SISTEMAS DE AR COMPRIMIDO INDUSTRIAIS

### 2.1 COMPOSIÇÃO DO AR ATMOSFÉRICO

A composição percentual que está presente no ar atmosférico varia de região para região. O gás encontrado em maior proporção no ar atmosférico é o nitrogênio, que constitui cerca de 78% de seu volume total, na proporção aproximada de uma molécula de oxigênio para cada quatro de nitrogênio, então teremos aproximadamente 21% de oxigênio. Em quantidades inferiores, cerca de 1%, são encontrados argônio, neônio, hélio, dióxido de carbono, metano, criptônio, hidrogênio, xenônio, ozônio, óxidos nitrosos e dióxido de enxofre. Além desses gases, podem estar presentes impurezas em suspensão, tais como vapor d'água e partículas de poeira ou microrganismos. A Tabela 02 representa a composição do ar seco.

*ppmv: partes por milhão por volume (nota: a fração volumétrica somente é igual à fração molar para gases ideais)*

Gás	Volume
Nitrogênio (N <sub>2</sub> )	780.840 ppmv (78.084%)
Oxigênio (O <sub>2</sub> )	209.460 ppmv (20.946%)
Argônio (Ar)	9.340 ppmv (0.9340%)
Dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> )	380 ppmv (0.0380%)
Neônio (Ne)	18,18 ppmv (0.001818%)
Hélio (He)	5,24 ppmv (0.000524%)
Metano (CH <sub>4</sub> )	1,79 ppmv (0.000179%)
Criptônio (Kr)	1,14 ppmv (0.000114%)
Hidrogênio (H <sub>2</sub> )	0,55 ppmv (0.000055%)
Óxido nitroso (N <sub>2</sub> O)	0,3 ppmv (0.00003%)
Xenônio (Xe)	0,09 ppmv (9×10 <sup>-6</sup> %)
Ozônio (O <sub>3</sub> )	0,0 to 0,07 ppmv (0% to 7×10 <sup>-6</sup> %)
Dióxido de nitrogênio (NO <sub>2</sub> )	0,02 ppmv (2×10 <sup>-6</sup> %)
Iodo (I)	0,01 ppmv (1×10 <sup>-6</sup> %)
Monóxido de carbono (CO)	0,1 ppmv (0.00001%)
Amônia (NH <sub>3</sub> )	traços

Tabela 02 – Composição do Ar Seco  
 Fonte: site: <http://pt.wikipedia.org/wiki/Ar>.

## 2.2 CONCEITOS BÁSICOS DO AR COMPRIMIDO

Para falar de ar comprimido devem-se entender os conceitos da termodinâmica conforme as leis a seguir:

- 1º Princípio da termodinâmica: A energia não pode ser criada ou destruída durante um processo, embora possa mudar de uma forma de energia para outra forma de energia.

- 2º Princípio da termodinâmica: Assim como a água, que sem qualquer trabalho externo, só pode fluir de um local mais alto para outro mais baixo, também o calor, sem qualquer trabalho externo, só pode fluir de um corpo de maior temperatura para outro corpo de menor temperatura. Ou ainda, qualquer tipo de energia, sem qualquer trabalho externo, só pode fluir de um potencial mais alto para outro mais baixo.

Temperatura - O que é: A variável temperatura é definida como a medida da energia cinética média dos átomos ou moléculas de uma substância, dada em graus Centígrados, Kelvin ou Fahrenheit. À medida que um corpo absorve energia, sua temperatura aumenta.

Calor - O que é: Sempre que existir um gradiente de temperaturas no interior de um sistema, haverá transferência desta energia, no sentido das temperaturas mais altas para as mais baixas. A energia em trânsito é chamada calor e o processo de transporte é denominado transmissão de calor.

Pressão de um gás - O que é: As moléculas de um gás submetido à uma temperatura qualquer, estão animadas de uma energia cinética cuja média é a temperatura à que estão submetidas. Portanto estas moléculas se movem e quando encerradas em um recipiente, colidem com as paredes deste recipiente. Ao efeito integrado destas colisões, chamamos pressão do gás.

Compressibilidade - Todos os gases apresentam um certo grau de variação em relação à lei geral dos gases. A variação aumenta com a densidade e com a proximidade do estado líquido.

A compressibilidade é derivada experimentalmente dos dados do comportamento existente em um gás particular, sob as mudanças de P, V e T.

O fator de compressibilidade (Z), é um multiplicador da fórmula básica:

$$P \cdot V = Z \cdot R \cdot T; \text{ ou: } Z = P \cdot V / (R \cdot T).$$

Umidade - O ar atmosférico sempre contém alguma umidade.

A pressão total do ar úmido é a soma das pressões parciais do vapor de água e do ar seco. (Dalton).

O ar está saturado quando a pressão parcial do vapor d'água for igual a pressão de saturação do vapor d'água à temperatura existente.

A pressão de saturação depende somente da temperatura.

O vapor d'água é superaquecido quando a pressão parcial é maior que a pressão de saturação.

Quando o ar é resfriado a pressão constante, então a pressão parcial será igual à pressão de saturação no "ponto de orvalho".

Qualquer resfriamento adicional provocará condensação da umidade, e uma parte da água será separada.

Portanto, no processo de compressão do ar, como se tem grandes variações de temperatura, o condensado aparece na compressão, e este condensado deve ser retirado, pois o mesmo pode causar grandes problemas na rede, como:

1. Oxidação: A maioria dos equipamentos pneumáticos são fabricados em aço carbono, portanto a oxidação das peças, implica em maior manutenção.

2. Prejuízo para a lubrificação.

3. Mau funcionamento dos componentes.

4. Redução na vazão de ar, pois provoca redução na área útil da tubulação, reduzindo a capacidade de vazão.

5. Golpes de aríete.

6. Congelamento. Em locais de clima frio o condensado pode congelar-se provocando redução da capacidade de vazão na tubulação, mal funcionamento de válvulas e outros.

Na Tabela 03 pode-se verificar a quantidade de água, em gramas, por metro cúbico de ar seco em diferentes temperaturas de admissão do ar.

TEMP °C	PRES.ATM	4 kg/cm <sup>2</sup>	6 kg/cm <sup>2</sup>	8 kg/cm <sup>2</sup>	10 kg/cm <sup>2</sup>
0	4,8	1,2	0,8	0,6	0,48
5	4,2	1,8	1,2	0,9	0,72
10	9,6	2,4	1,6	1,2	0,96
15	13,2	3,3	2,2	1,6	1,32
20	18,4	4,6	3,0	2,3	1,84
25	24,0	6,0	4,0	3,0	2,40
30	30,0	7,5	5,0	3,8	3,00
35	41,0	10,2	6,8	5,1	4,10
40	52,0	13,0	8,7	6,5	5,20
45	70,0	17,5	11,7	8,8	7,00
50	87,0	21,7	14,5	10,8	8,70

Tabela 03 – Conteúdo de Água no Ar Saturado (gramas de água por m<sup>3</sup> de ar seco)  
 Fonte: Atlas Copco, Distribuição de Ar, número: 15, ano: 2.002.

Todo compressor e de qualquer tipo, ao aspirar o ar atmosférico para comprimi-lo acaba aspirando também a umidade presente na atmosfera. Por esta razão, todo ar comprimido tem naturalmente muita água sob a forma de vapor ou gotículas. E para retirar a água, existem acessórios adequados, tais como “after coolers”, secadores de ar comprimido tipo deliquescente, refrigeração ou adsorção. Vale lembrar que apenas os secadores eliminam 100% da água na forma líquida em sistemas de ar comprimido.

No Gráfico 02 estão demonstrados os diferentes níveis de secagem do ar comprimido, de acordo com o equipamento utilizado.

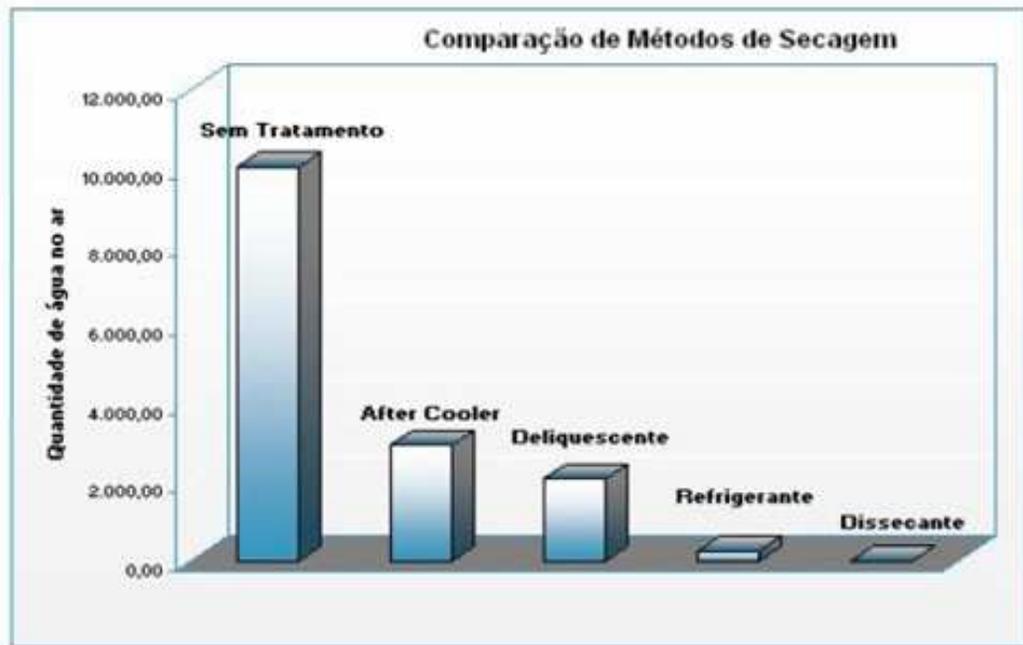


Gráfico 02 – Comparação dos Métodos de Secagem de Ar Comprimido

Fonte: site: BlogAr - <http://mktproject.com.br/blogar/>.

## RESFRIADOR INTERMEDIÁRIO

O resfriamento entre estágios de compressão tem como função dissipar o calor gerado pela compressão do estágio anterior.

Com a redução da temperatura conseguem-se dois objetivos: redução do consumo específico de energia e a separação de parte da umidade contida no ar.

Portanto uma boa dissipação no inter-cooler é de grande importância no rendimento do compressor e conseqüente otimização do consumo de energia.

O resfriamento em compressor pequeno é feito por ar, e nos compressores maiores a refrigeração é feita por água.

O que pode afetar esta troca é a incrustação nos condutos de refrigeração.

A água deve ser clarificada, e de baixa dureza para evitar incrustações.

## RESFRIADOR POSTERIOR (AFTER COOLER)

O ar descarregado do compressor está aquecido e, portanto, com grande capacidade de retenção de umidade. Com a finalidade de retirar parte desta umidade, é normalmente instalado após a descarga, um resfriador. Este resfriador é

chamado de resfriador posterior. Um bom projeto de resfriador posterior consegue que a temperatura do ar descarregado varie de 10° C a 15° C acima da temperatura de entrada de água de refrigeração.

Os resfriadores intermediários e posteriores podem em conjunto retirar de 65% a 80% da umidade contida no ar. Mas nem toda umidade consegue ser retirada pelo separador, permanecendo cerca de 20% em forma de névoa, que é arrastada pela corrente de ar. Portanto na determinação da quantidade de condensado eliminado pelo resfriador posterior, deve-se considerar o rendimento do separador. (Fonte: Artigo da CSE – Consultoria e Serviços de Engenharia, disponível no site: <http://pt.scribd.com/doc/22252896/Manual-do-ar-comprimido>).

## SECAGEM POR REFRIGERAÇÃO

Os secadores por refrigeração são utilizados para aplicações que necessitam de ar comprimido seco aliado a um baixo custo de aquisição e manutenção.

O seu funcionamento se baseia no resfriamento do ar comprimido em um sistema frigorífico com freon e posterior remoção do condensado formado pelo mesmo. O ar comprimido saturado entra no secador e é arrefecido no evaporador do ciclo de frio do secador, durante este arrefecimento ocorre à condensação de vapor de água contido no ar comprimido e é efetuada a remoção do condensado num separador de líquidos e em seguida um aquecimento sensível com o ar comprimido de entrada.

As vantagens dos secadores por refrigeração são:

- ponto de orvalho constante.
- pouca manutenção.
- baixo custo de operação.
- não é danificado por vapores de óleo ou aerossóis.

As desvantagens são:

- não atinge ponto de orvalho muito baixo (2°C a 3°C).

## SECAGEM POR ADSORÇÃO

Os secadores por adsorção ou regenerativos, são utilizados para aplicações que necessitam de ar comprimido extremamente seco.

A secagem é obtida recorrendo a material poroso com elevado poder de atração das moléculas de água, conhecido como material dessecante (sílica gel ativada ou peneira molecular) que em contato com o ar comprimido removem o seu vapor d'água a níveis extremamente baixos. Este material dessecante tem a propriedade de que, uma vez saturado de umidade, pode ser regenerado e reutilizado outra vez. Deste modo um secador de adsorção é constituído por dois setores distintos, estando um em fase de secagem e o outro em regeneração.

Os vários tipos de secadores de adsorção diferenciam-se devido aos diferentes métodos utilizados para regeneração do dessecante. Existem secadores com a regeneração efetuada através da utilização de ar seco a passar pelo dessecante úmido, e a ser purgado para a atmosfera. Outros secadores utilizam ar aquecido com resistências elétricas, outros empregam um sistema misto, e outros ainda utilizam o calor de compressão para regeneração. (ATLAS COPCO, 2006).

Para efetuar a seleção de um secador em função do ponto de orvalho, vazões e pressão pretendida, considera-se:

- Energia gasta para regeneração do dessecante. As potências envolvidas no processo de aquecimento e circulação de ar pelo interior da torre em regeneração, 1 l/s a 7 bar purgado para atmosfera para regeneração requer 0,35 kW de sobre dimensionamento do compressor.

- Perda de carga através do secador, 1 bar de acréscimo de pressão representa 7% na potência consumida pelos compressores.

O método mais econômico de regenerar o material dessecante é o aproveitamento do calor desenvolvido na compressão do ar. Deste modo o ar comprimido após a saída do ultimo estágio de compressão, passa no setor do secador que está em regeneração, removendo a umidade de dessecante, em seguida é arrefecido e passa pelo setor que está em secagem. Este sistema permite a exploração do secador sem qualquer consumo de energia.

As vantagens dos secadores regenerativos são:

- baixo ponto de orvalho (até  $-73^{\circ}\text{C}$ ).
- nenhuma água para ser drenada.

- custo de operação moderado, considerando os baixos pontos de orvalho.

As desvantagens são:

- alto custo inicial.
- é necessária manutenção periódica nas torres de dessecante.
- aerossóis de óleo podem saturar o material dessecante.

## SECAGEM POR ABSORÇÃO

Os secadores por absorção não são normalmente utilizados visto que a secagem é obtida através de uma reação química que resulta subprodutos agressivos. O material utilizado nos secadores de absorção não é passível de ser regenerado, logo a sua utilização torna-se inviável financeiramente dada à necessidade da sua contínua substituição.

Também chamados de deliquescentes estes secadores utilizam um material dessecante higroscópico que tem uma elevada afinidade com a água. O dessecante retira vapor de água do ar comprimido e se dissolve no líquido formado. E é consumido durante a operação. Para manter um nível adequado do leito do dessecante numa instalação média, ele deve ser complementado duas a três vezes por ano. O secador deliquescente não possui peças móveis e não necessita de energia. Essa simplicidade resulta em custos menores de instalação, porém a redução do ponto de orvalho é de apenas  $-6,7^{\circ}\text{C}$  à  $-1^{\circ}\text{C}$ .

As vantagens dos secadores por absorção são:

- baixo custo inicial.
- não existência de peças móveis.

As desvantagens desses secadores são: (Rollins, 2004).

- redução limitada do ponto de orvalho. ( $-1^{\circ}\text{C}$  à  $-6,7^{\circ}\text{C}$ ).
- o dessecante precisa ser substituído regularmente.
- custos de operação e manutenção caros.

• o material dessecante pode passar para a tubulação de distribuição de ar, caso não exista um sistema eficiente de filtragem. Isso pode ter um efeito danoso sobre a tubulação de ar e os equipamentos instalados.

• Algumas matérias dessecantes derretem ou se fundem com temperaturas acima de  $32^{\circ}\text{C}$ , isso permite que o ar úmido passe sem reagir com o dessecante anulando sua função.

Como referência, na Tabela 04, tem-se uma relação entre a quantidade de água e o valor de ponto de orvalho em diferentes aplicações industriais.

Tipos de equipamento ou aplicação	Conteúdo de Água	
	a) b) ponto de orvalho	mg/m <sup>3</sup>
Ferramentas e motores industriais	a) b) P.O 10°C abaixo da temperatura ambiente	5
Componentes pneumáticos não lubrificados	a) b) P.O 10°C abaixo da menor temp. do sistema	1
Componentes pneumáticos lubrificados	a) b) P.O 10°C abaixo da menor temp. do sistema	1
Pintura em spray	a) b) P.O 10°C abaixo da menor temp. do sistema	1
Limpeza por jateamento	a) b) P.O 10°C abaixo da menor temp. do sistema	5
Ar de instrumentação	a) b) P.O abaixo da temperatura ambiente	1
Ar de respiração	a) b) P.O 10°C abaixo da temperatura ambiente	1
Indústria alimentícia	b) P.O 10°C abaixo da temperatura ambiente	

Tabela 04 – Quantidade de água e Ponto de Orvalho em Aplicações Industriais  
Fonte: site: BlogAr - <http://mktproject.com.br/blogar/>.

### 2.3 TIPOS DE COMPRESSORES

A Figura 01 mostra os diversos tipos de compressores, que se dividem em compressores dinâmicos e deslocamento.

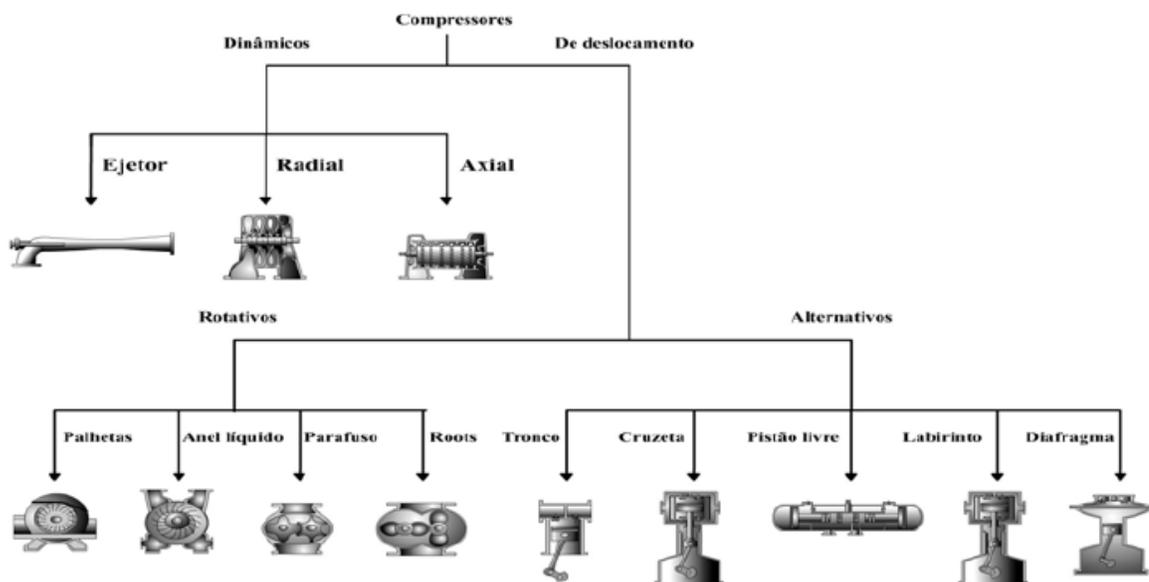


Figura 01 – Tipos de Métodos de Compressão

Fonte: Artigo da CSE – Consultoria e Serviços de Engenharia, disponível no site:  
<http://pt.scribd.com/doc/2252896/Manual-do-ar-comprimido>.

### 2.3.1 Compressores Dinâmicos

Os compressores dinâmicos realizam a transformação da energia cinética em pressão, ou seja, se gasta energia para movimentar fortemente o ar captado à atmosfera e quando este desacelera a pressão aumenta. Os compressores dinâmicos podem ser divididos em duas classes:

- Centrífugos ou radiais;
- Axiais.

Na indústria, de um modo geral, operam à volta de 20000 rpm, embora velocidades superiores sejam cada vez mais comuns.

#### 2.3.1.1 Compressores centrífugos ou radiais

Nos compressores centrífugos a compressão processa-se perpendicularmente ao veio motor e a descarga do ar efetua-se segundo a tangente ao raio das pás impulsoras.

Unidades indicadas para produzirem ar isento de óleo.

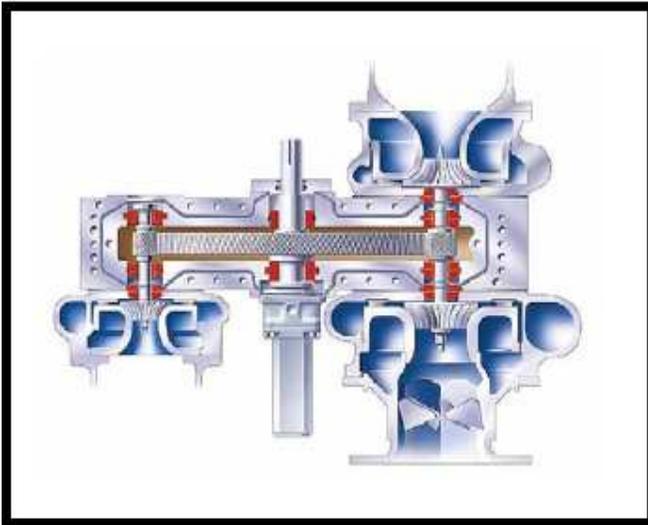


Figura 02 – Compressor Centrífugo  
Fonte: Atlas Copco, 2006.

#### 2.3.1.2 Compressores axiais

Os compressores axiais realizam a compressão paralelamente ao veio motor, daí a designação de axial.

O caudal (vazão volumétrica) mínimo em jogo é de tal forma elevado (900 m<sup>3</sup>/min) que dificilmente se destina à produção de ar comprimido, pelo menos, para a dimensão de um sistema industrial.



Figura 03 – Compressor Axial  
Fonte: site: <http://kaiohdutra.files.wordpress.com/2010/10/aula-2-e-3-compressores.pdf>.

### 2.3.2 Compressores por Deslocamento

Os compressores por deslocamento realizam a compressão através da diminuição de um volume, ou seja, a pressão do gás aumenta se o volume, onde está contido, diminuir.

Os compressores volumétricos classificam-se em:

- Alternativos (pistão ou êmbolo);
- Rotativos.

Condições de trabalho, por exemplo, 6 m<sup>3</sup>/min a 35 bar, 50 m<sup>3</sup>/min a 200 bar ou 90 l/s a 1000 bar, a única solução tecnológica atual continua, ainda, no recurso ao compressor alternativo.

#### 2.3.2.1 Compressores alternativos

Utiliza-se o sistema biela – manivela para conversão do movimento rotativo de um eixo, em movimento translacional de um pistão ou embolo, desta forma conforme o movimento de rotação do acionador, o pistão efetua o percurso de ida e volta na direção do cabeçote, configurando o ciclo de operação. O funcionamento do compressor alternativo está relacionado às válvulas, que possuem como elemento móvel o obturador, permitindo entrada e saída do gás na câmara de compressão. (RIBEIRO ROCHA, 2005).

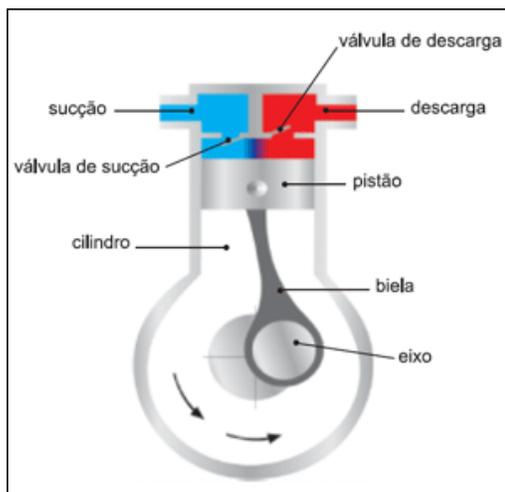


Figura 04 – Compressor a Pistão  
Fonte: Atlas Copco, 2006.

### 2.3.2.2 Compressores rotativos

São tipos de compressores rotativos:

- Roots;
- Palhetas;
- Espiral;
- Parafuso;
- Dentês;

#### 2.3.2.2.1 Compressor do tipo roots

Consiste num corpo de secção elíptica (oval) contendo dois rotores simétricos impulsores em forma de oito, rodando em sentidos opostos e cujos lóbulos engrenam, isto é, a parte convexa de um penetra na côncava do outro, sincronizados por engrenagens exteriores.

O espaço por onde o ar passa não é lubrificado, dando origem a ar comprimido isento de óleo.

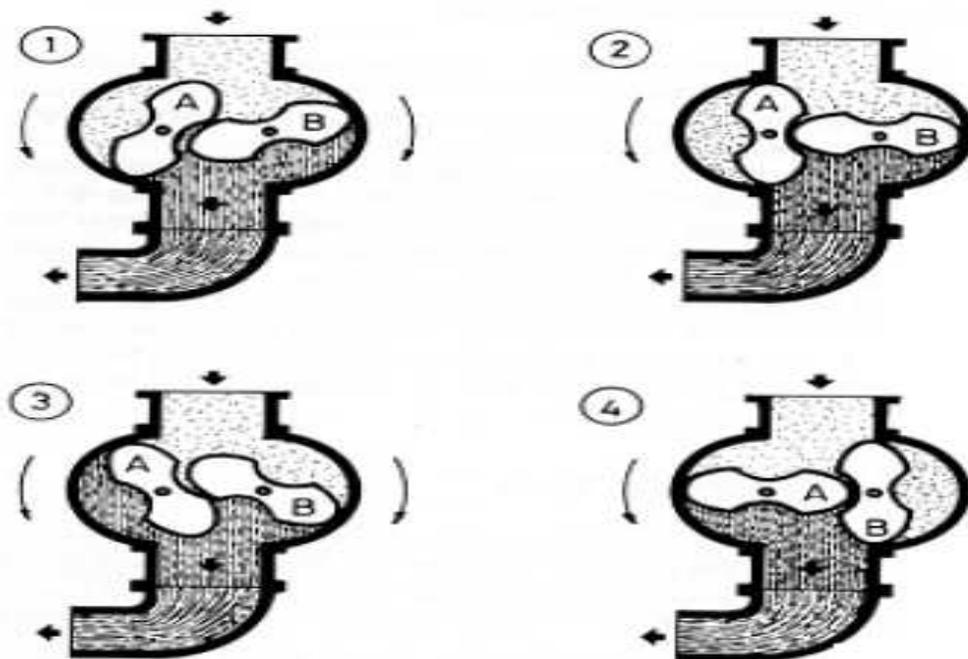


Figura 05 – Compressor tipo Roots

Fonte: site: <http://kaiohdutra.files.wordpress.com/2010/10/aula-2-e-3-compressores.pdf>.

### 2.3.2.2.2 Compressor a palhetas

A redução de volume existe porque à medida que o ar admitido à atmosfera é transportado por bolsas formadas entre palhetas, esses espaços (bolsas móveis) são gradualmente reduzidos quando o rotor se move no sentido dos ponteiros de um relógio.

A pressão máxima de ar comprimido que este tipo de compressor pode chegar é 10 bar.

Compressores não possuem válvulas e tanto podem ser arrefecidos por ar como por água.

Fornecimento uniforme de ar livre de qualquer pulsação.

Para evitar o atrito entre o estator e as palhetas, a unidade é lubrificada e, portanto, a película de óleo existente entre as peças móveis e o corpo fixo garante que não haja contato metálico.



Figura 06 – Compressor a Palhetas

Fonte: site: <http://kaiohdutra.files.wordpress.com/2010/10/aula-2-e-3-compressores.pdf>.

### 2.3.2.2.3 Compressor espiral

Princípio de funcionamento inovador e de extrema simplicidade: compreende uma espiral fixa e outra orbitante e a compressão do ar processa-se pela interação destas duas espiras.

O processo de compressão repete-se continuamente, gerando um caudal de ar isento de pulsações.

Concepção verdadeiramente revolucionária ainda que é usado para caudais pequenos (2,7 a 6,7 l/s e pressões até 10 bar) e, naturalmente, para pequenas potências (1,5 – 2,2 e 3,7 kW).

Produção de ar comprimido isento de óleo destinado a aplicações altamente exigentes.

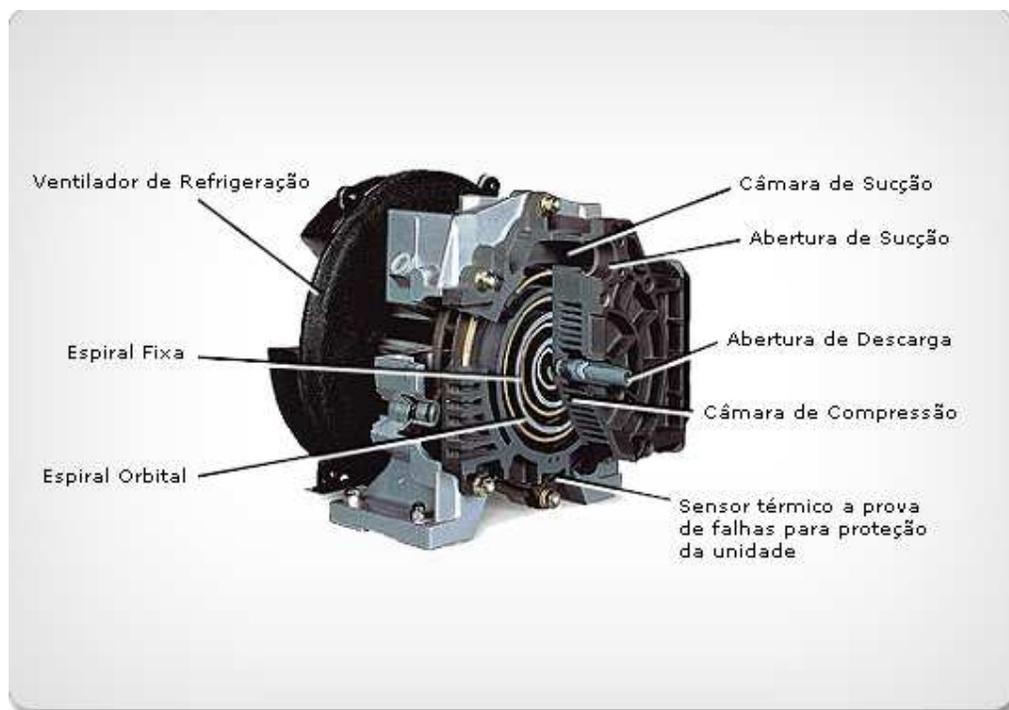


Figura 07 – Compressor Espiral  
Fonte: BlogAr.

#### 2.3.2.2.4 Compressor a parafuso

Neste compressor há dois rotores no formato de parafusos, que giram em sentidos opostos. As conexões ao sistema são as aberturas de sucção e de descarga. O gás entra pela abertura de sucção, ocupa os espaços disponíveis entre os filetes dos rotores, com o movimento entre os rotores o espaço ocupado pelo gás vai se reduzindo, e ocorre à compressão (Rodrigues, 1991).

A relação de compressão depende da geometria da máquina e da natureza do gás a ser comprimido:

- à medida que os rotores giram, cria-se uma depressão responsável pela admissão do ar;

- o movimento de rotação produz uma compressão suave do ar, até que cada seção atinja o bocal de descarga;
- o ar comprimido é descarregado para fora do elemento compressor.

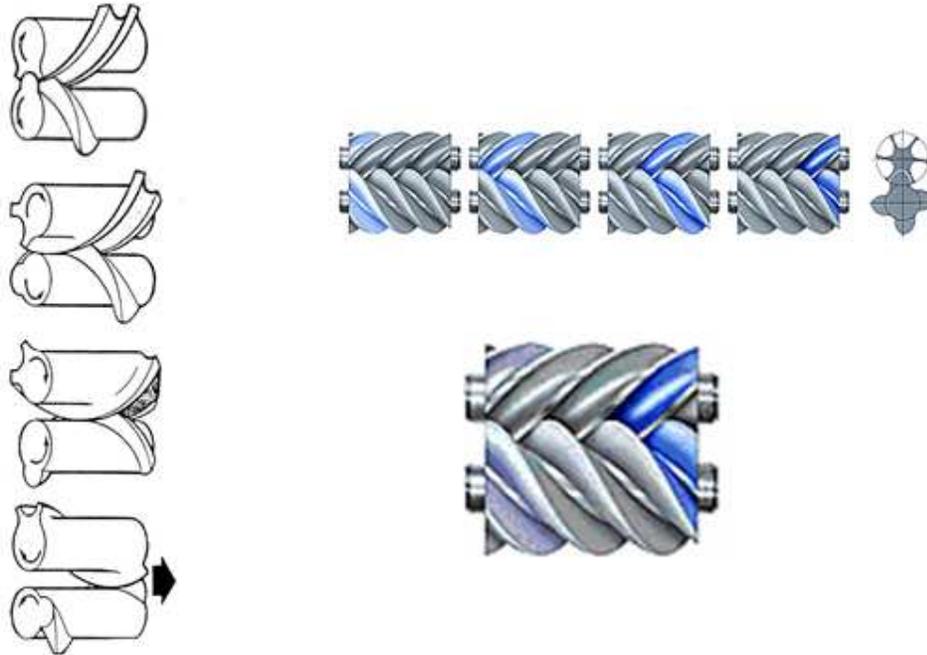


Figura 08 – Processo de Compressão.  
Fonte: BlogAr.



Figura 09 – Compressor a Parafuso  
Fonte: BlogAr.

### 2.3.2.2.5 Compressor de lóbulos

Este tipo de compressor distingue-se dos helicoidais porque os elementos básicos de compressão têm a forma de dentes.

Tal como os de parafuso possuem um rotor macho e um rotor fêmea que rodam em sentidos opostos e não há contato metálico entre eles, visto existirem engrenagens que os afastam, com tolerâncias muito rigorosas e simultaneamente os sincronizam.

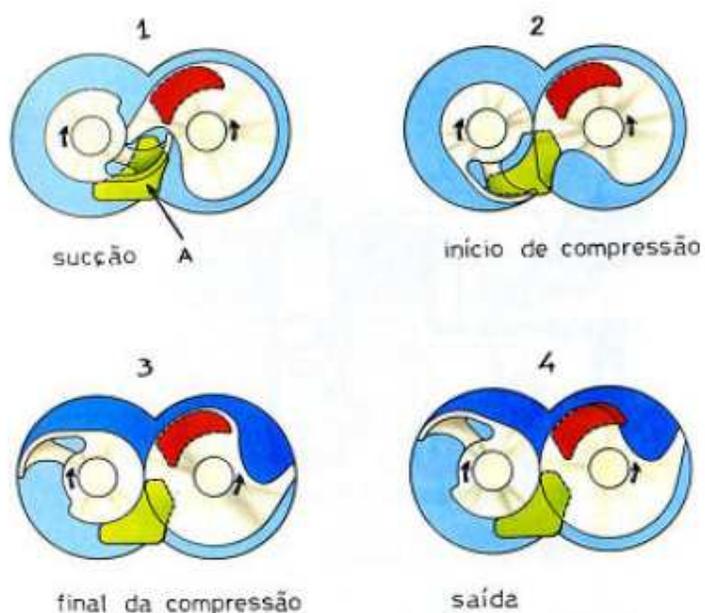


Figura 10 – Compressor de Lóbulos

Fonte: site: <http://kaiohdutra.files.wordpress.com/2010/10/aula-2-e-3-compressores.pdf>.

No Gráfico 03 podemos verificar as diferentes tecnologias de processos de compressão relacionando a vazão pela energia específica gasta em cada processo.

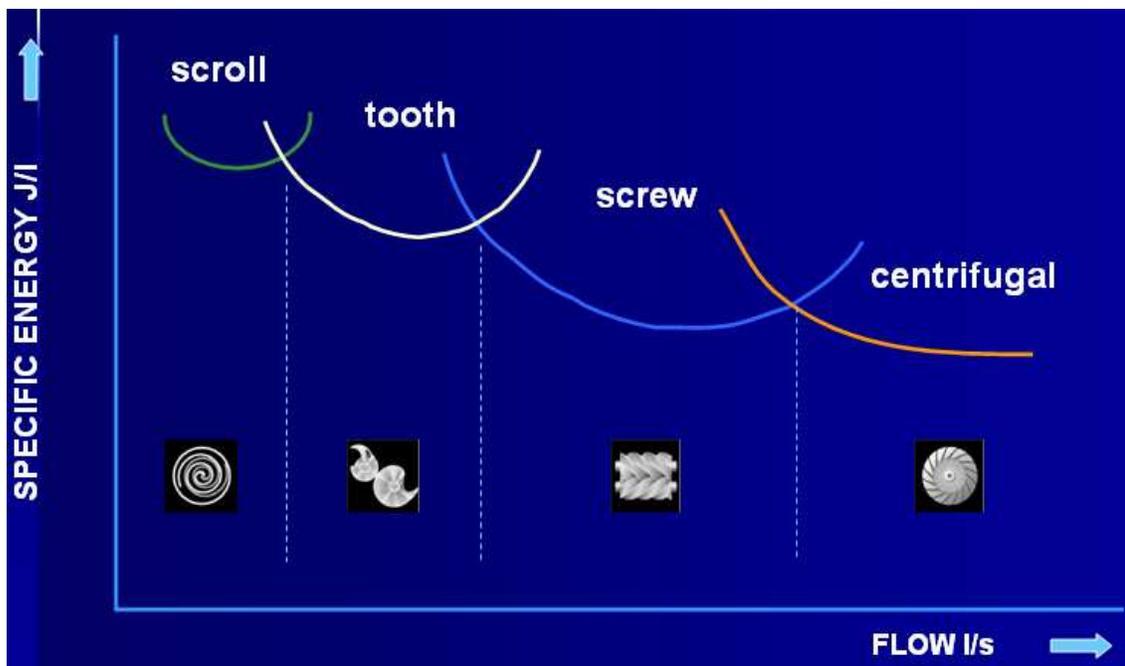


Gráfico 03 – Relação entre Vazão e Energia Específica em cada processo de compressão  
Fonte: Atlas Copco, 2006.

## 2.4 SUBSISTEMAS DE AR COMPRIMIDO

O objetivo da instalação de um sistema de ar comprimido é fornecer ar para vários pontos de aplicação em condições de quantidade e qualidade suficientes e com pressão adequada para uma operação eficiente das ferramentas pneumáticas e outros dispositivos do ar comprimido. Antes de determinar a quantidade de ar comprimido necessária, deve ser feita uma investigação sobre todas as aplicações conhecidas e prováveis.

Neste trabalho não será demonstrado o projeto de redes de ar comprimido, a intenção é analisar as redes já existentes.

Para se trabalhar eficientemente com o ar comprimido deve-se entender como é constituído todo o sistema que envolve uma planta de ar comprimido, assim como o processo industrial onde se está trabalhando.

Um sistema de ar comprimido é composto principalmente por três partes fundamentais: geração, distribuição e consumo final. A Figura 11 demonstra um sistema de ar comprimido.

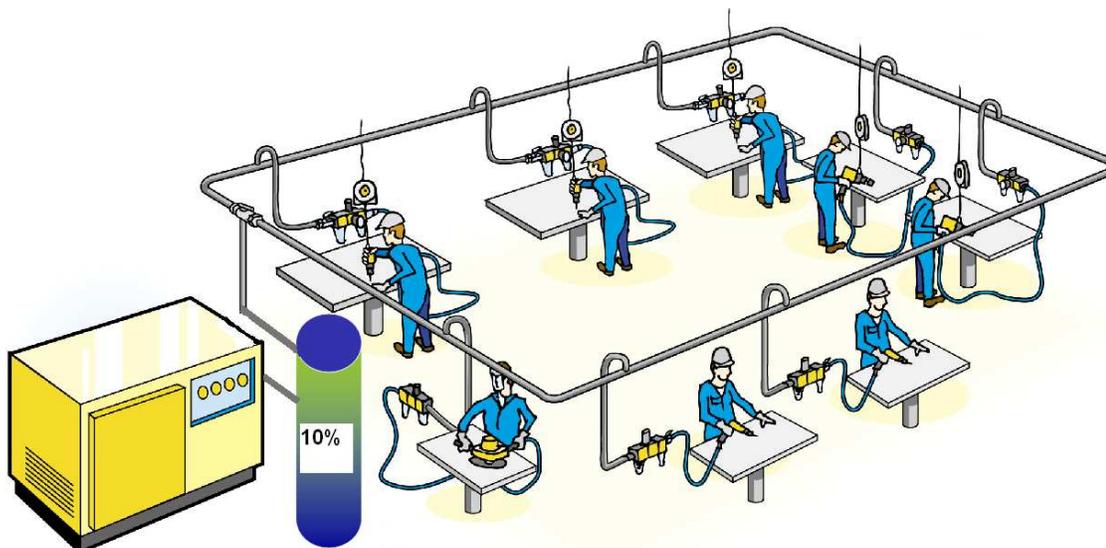


Figura 11 – Sistema de Ar Comprimido  
Fonte: Atlas Copco, Distribuição de Ar, número: 15, ano: 2.002.

### 2.4.1 Geração

A geração é composta pelos compressores de ar, secadores de ar e sistemas de tratamento, assim como também a própria sala de máquinas.

O sistema de geração de ar comprimido pode ser centralizado (única central de compressores) ou descentralizado (vários pontos de geração de ar comprimido espalhados pela Fábrica).

#### 2.4.1.1 Sistema descentralizado

A principal vantagem dos sistemas descentralizados é a flexibilidade. Em grandes fábricas com futuras instalações difíceis de serem previstas, pequenas unidades pontuais podem ser adquiridas de acordo com a necessidade, fornecendo ar conforme a demanda adicional. Outro fator também é a condição econômica, quando não se pode financiar uma instalação de grande porte, pode ser instalado um sistema de unidades múltiplas e aumentá-lo mais tarde.

Mas mesmo em sistemas descentralizados, deve ser considerada a vantagem do agrupamento, ou seja, vários agrupamentos com pequenas máquinas, pois o custo das instalações pode ser reduzido, principalmente da água e da eletricidade. A capacidade pode ser facilitada com a interconexão de vários compressores, como também pode ser oferecida uma melhor regulagem para cargas variáveis. Desta forma um único operador pode supervisionar melhor vários compressores se estes estiverem agrupados num mesmo local. Se compressores de uma determinada marca e capacidade são mantidos como padrão dentro de um grupo, é possível manter um estoque menor de peças de reposição. Assim, algumas vantagens do sistema centralizado podem ser mantidas com o sistema de unidades múltiplas agrupadas. O intercâmbio de peças de desgaste também deve ser considerado, pois reduz custos e tempo de paradas e simplifica a estocagem de peças.

Nos sistemas descentralizados, nos quais os compressores são distribuídos em diversas localidades da fábrica inteira, o equipamento não deve ser instalado em cantos obscuros onde pode ser facilmente esquecido. Deve-se tomar cuidado para assegurar que cada compressor tenha espaço à manutenção necessária, e para que medidas apropriadas a um atendimento regular sejam tomadas. É muito importante que seja feita uma correta manutenção nos compressores como veremos adiante.

#### 2.4.1.2 Sistema centralizado

O sistema centralizado de geração tem várias vantagens, mas o mais importante é saber onde o sistema deve ser instalado, a sala deve ser instalada em um lugar onde se tenha ar limpo e fresco para admissão.

A sala de compressores deve ser bem ventilada, pois elevadas temperaturas permitem elevadas quantidades de vapor de água no ar atmosférico, o qual é admitido no compressor. Haverá uma grande quantidade de água a ser retirada do ar comprimido, o que causará uma diminuição na eficiência energética de todo o sistema.

O ar atmosférico, com altas temperaturas, diminui o rendimento do compressor (maior volume e maior massa de ar). Altas temperaturas, também, diminuem a vida útil do óleo lubrificante.

Necessidades intermitentes e variáveis de ar comprimido de diferentes aplicações podem ser combinadas para uma carga relativamente constante com uma capacidade total reduzida, enquanto que o sistema descentralizado, um compressor isolado não pode ser utilizado para atender uma carga de pico em outro local da indústria. A água para resfriamento e a eletricidade somente são necessárias na sala central de compressores. O ruído pode ser isolado e reduzido com maior facilidade. Podem ser instalados equipamentos e controles auxiliares não justificáveis economicamente nas instalações menores de unidades múltiplas. (Compressed Air and Gas Handbook, 1989).

Para sistemas centralizados deve ser previsto sempre um compressor reserva, para atender picos de vazão momentâneos e assumir a carga quando algum compressor principal estiver em manutenção.

Em uma instalação pode haver fontes de alto consumo de ar, mas com baixo nível de utilização. Em tais casos, o total do fluxo de ar requerido deve ser corrigido com acréscimo, a fim de evitar quedas bruscas de pressão nas linhas de distribuição. Para estes casos de alto consumo durante um breve tempo, podem-se prover tais fontes de consumo com um sistema de ar separado, ou instalar um reservatório de ar auxiliar, que servirá de pulmão durante o alto consumo.

O volume do reservatório deve ser 6 vezes o fluxo por segundo ou 1/10 do fluxo por minuto ou 1 / 600 do fluxo por hora. Ou, de uma forma mais simples, o

volume do reservatório deve ter a capacidade de 10% da geração total de ar comprimido. (Fonte: Atlas Copco, Distribuição de Ar, número: 15, ano: 2.002).

#### 2.4.2 Distribuição

Em um sistema industrial, o transporte do ar comprimido através de uma central ou gerações isoladas é feito através da rede de ar comprimido. A rede de distribuição de ar comprimido compreende todas as tubulações que saem do (s) compressor (es), passando pelo (s) secador (es), passando pelo reservatório, e que, unidas, levam o ar comprimido até os pontos individuais de utilização.

A rede possui duas funções básicas:

1. Interligar a fonte de geração com os equipamentos consumidores.
2. Funcionar como um reservatório para atender às exigências locais.

Um sistema de distribuição perfeitamente executado deve apresentar os seguintes requisitos:

- Manter a pressão: A perda de carga provocada pela tubulação deve ser a mínima economicamente possível;
- Manter a vazão: Os vazamentos devem ser reduzidos ao mínimo;
- Eliminar o condensado: A umidade condensada na tubulação deve ser adequadamente eliminada do sistema.

Para que a rede de distribuição atenda a estas condições, cuidados especiais devem ser tomados com o objetivo de minimizar estes efeitos prejudiciais.

Primeiramente um traçado básico da tubulação deve ser executado, analisando-se todos os pontos de utilização, com o objetivo de aperfeiçoar o sistema.

Visando melhor desempenho na distribuição do ar, a definição do layout é importante.

Uma documentação eficiente deve estar em posse do pessoal da manutenção, como por exemplo, o leiaute da rede de ar comprimido, este deve ser construído em desenho isométrico ou escala, permitindo a obtenção do comprimento das tubulações nos diversos trechos. O layout apresenta a rede principal de distribuição, suas ramificações, todos os pontos de consumo, incluindo futuras aplicações, qual a pressão destes pontos, e a posição de válvulas de fechamento,

moduladoras, conexões, curvaturas, separadores de condensado, etc. Através do layout como o da Figura 12, pode-se então definir o menor percurso da tubulação, acarretando menores perdas de carga e proporcionando economia.

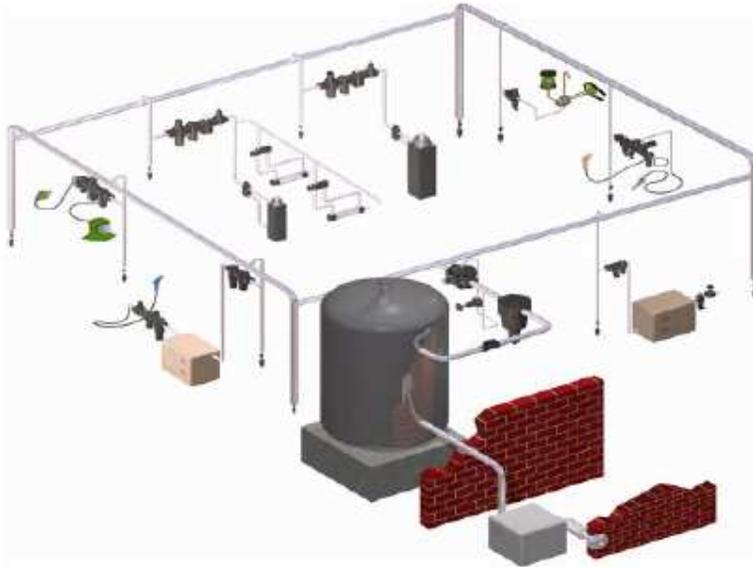


Figura 12: Layout do sistema de ar comprimido  
Fonte: Júnior, J. H. Sistema Hidropneumáticos, 2007.

Com relação ao formato da rede de ar comprimido, a mesma pode ser executada em dois tipos: circuito fechado ou circuito aberto devem-se analisar as condições favoráveis e desfavoráveis de cada uma.

#### 2.4.2.1 Circuito fechado

Geralmente a rede de distribuição é em circuito fechado, em torno da área onde há necessidade do ar comprimido. Deste anel partem as ramificações para os diferentes pontos de consumo. O anel fechado auxilia na manutenção de uma pressão constante, além de proporcionar uma distribuição mais uniforme do ar comprimido para os consumos intermitentes.

As vantagens desse sistema de distribuição é a possibilidade de se alimentar um ramal por ambos os sentidos, conseguindo-se uma maior flexibilidade

para manutenção e também maiores garantias na qualidade e estabilidade do ar na rede.

As desvantagens deste sistema são que normalmente custo inicial de instalação maior e também se tem uma maior dependência do layout dos equipamentos (menor flexibilidade para mudanças não planejadas).

Na Figura 13 temos um exemplo de circuito fechado.

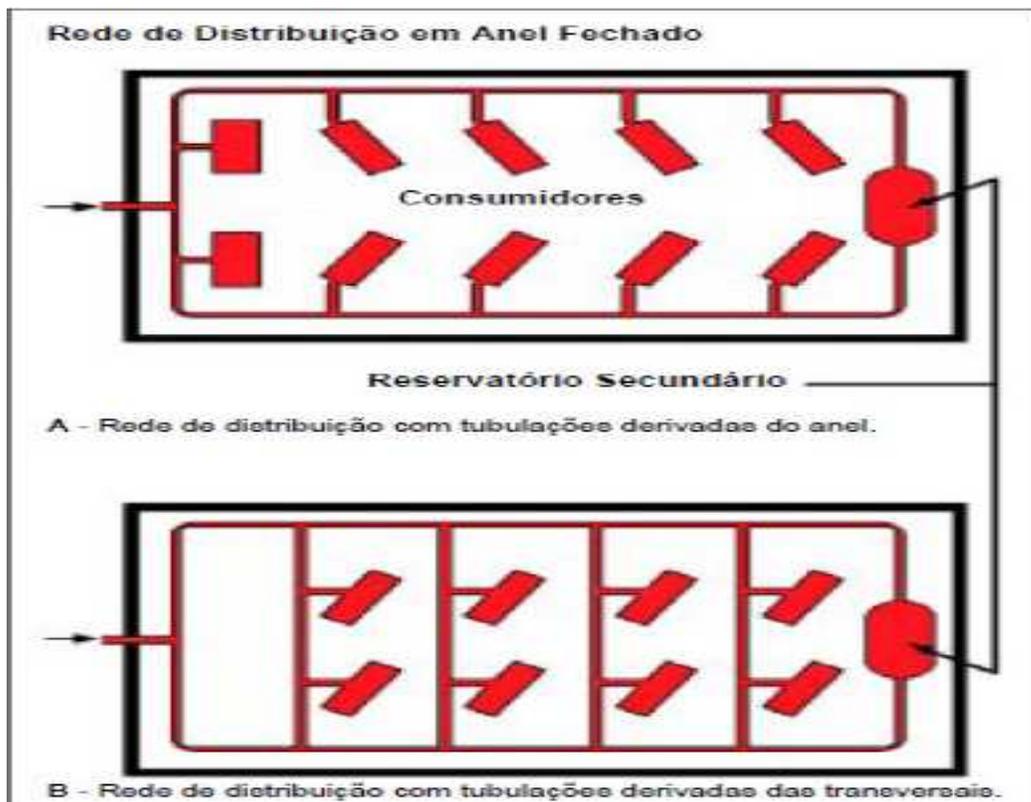


Figura 13 – Circuito Fechado  
Fonte: Training Parker, 2000.

#### 2.4.2.2 Circuito aberto

É um sistema no qual a tubulação de distribuição assume a forma de "espinha de peixe", isto é, os tubos ramificam-se à partir da rede principal encaminhando-se até os consumidores situados na sua extremidade.

Basicamente este sistema é utilizado em situações onde o ponto de consumo está situado a grandes distâncias da casa de compressores ou quando os pontos de consumo estão alinhados.

As vantagens desse sistema de distribuição são que normalmente os custos iniciais são menores e menor amarramento (dependência) no layout tornando-o mais flexível a mudanças.

As desvantagens deste sistema são as maiores possibilidades de problemas na qualidade do ar da rede (umidade e quedas da pressão constante) e também a maior dificuldade nos controles.

Na Figura 14 temos um exemplo de circuito aberto.

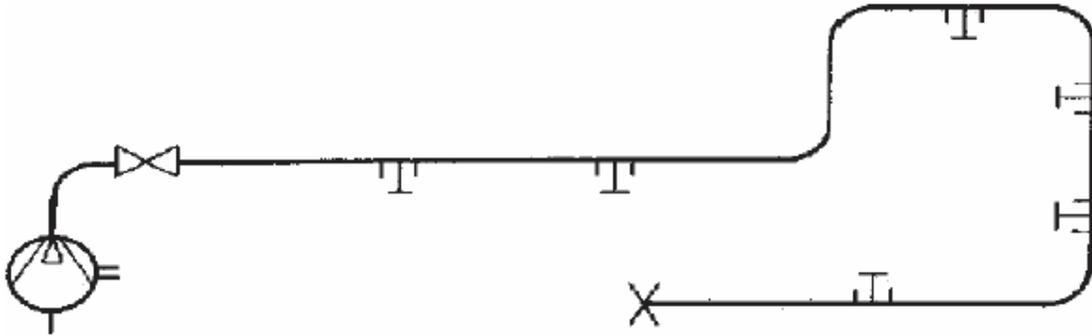


Figura 14 – Circuito Aberto

Fonte: Júnior, J. H. Sistema Hidropneumáticos, 2007.

### 2.4.2.3 Componentes da rede de ar

#### 2.4.2.3.1 Válvulas de fechamento nas linhas de distribuição

São de grande importância na rede de distribuição para permitir a divisão desta em seções, especialmente em casos de grandes redes, fazendo com que as seções tornem-se isoladas para inspeção, modificações e manutenção (Figura 15). Assim, evitamos que outras seções sejam simultaneamente atingidas, não havendo paralisação do trabalho e da produção.

As válvulas mais aplicadas até 2" são do tipo de esfera, diafragma. Acima de 2" são utilizadas as válvulas tipo gaveta.

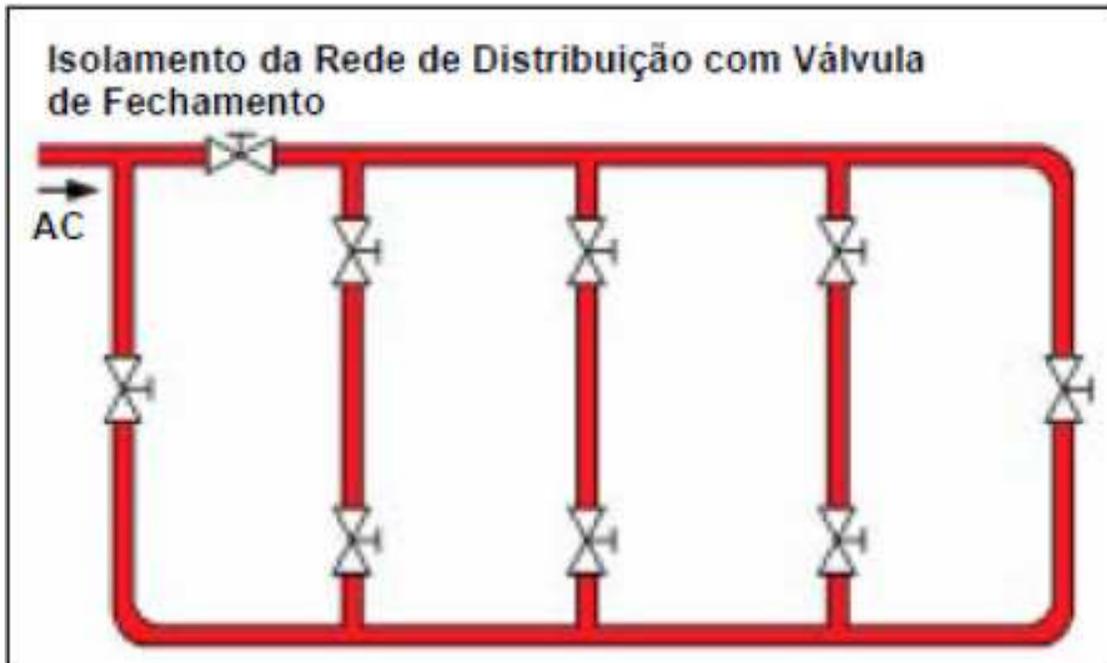


Figura 15 - Válvulas de fechamento na linha de distribuição  
Fonte: Training Parker, 2000.

#### 2.4.2.3.2 Reservatório

Como já citado anteriormente pode-se utilizar o reservatório para compensar grandes vazões em curtos espaços de tempo.

Um sistema de ar comprimido é dotado, geralmente, de um ou mais reservatórios. Em geral, o reservatório possui as seguintes funções:

- armazenar o ar comprimido;
- resfriar o ar auxiliando a eliminação do condensado (caso não se tenha secagem de ar na geração);
- compensar as flutuações de pressão em todo o sistema de distribuição;
- estabilizar o fluxo de ar;
- controlar as marchas dos compressores, etc...

Os reservatórios devem ser instalados de modo que todos os drenos, conexões e aberturas de inspeção sejam facilmente acessíveis. Em nenhuma condição, o reservatório deve ser enterrado ou instalado em local de difícil acesso; deve ser instalado, de preferência, fora da casa dos compressores, na sombra, para facilitar a condensação da umidade e do óleo contidos no ar comprimido; deve

possuir um dreno no ponto mais baixo para fazer a remoção deste condensado acumulado em cada 8 horas de trabalho; o dreno, preferencialmente, deverá ser automático. Os reservatórios são dotados ainda de manômetro, válvulas de segurança, e são submetidos a uma prova de pressão hidrostática, antes da utilização (Figura 16).

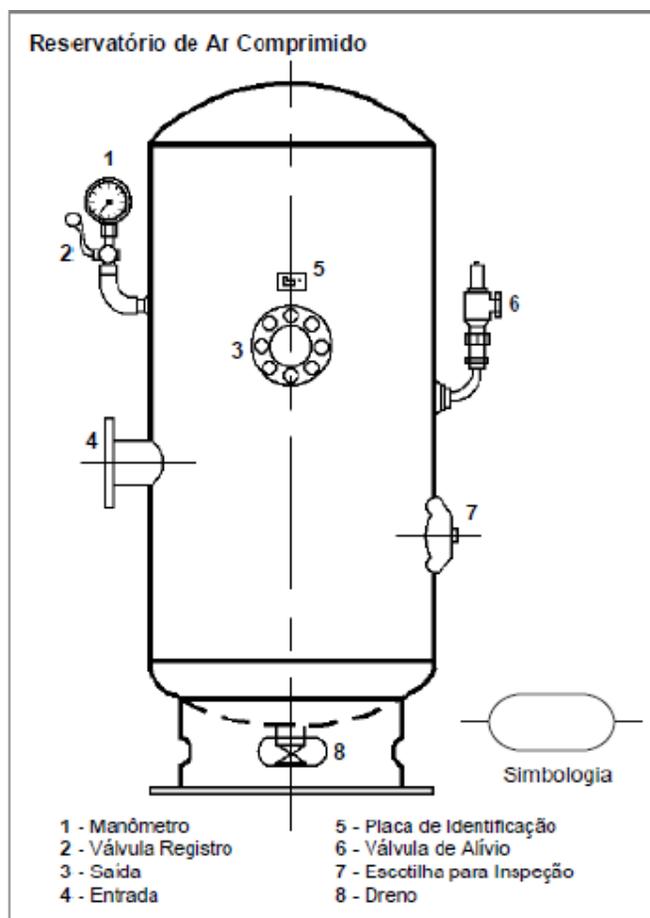


Figura 16 – Reservatório de Ar  
Fonte: Training Parker, 2000.

#### 2.4.2.3.3 Drenagem do ar comprimido

A umidade condensada na rede tende a decantar na parte inferior da tubulação.

Para que não haja acúmulo de condensado, a tubulação deve possuir uma inclinação de 1% para possibilitar que o condensado seja coletado em pontos de drenagem. A inclinação deve ser feita no sentido do fluxo, para facilitar condução de

condensado para os pontos de coleta. Atenção especial deve ser dada ao caso onde a rede de distribuição de ar comprimido é do tipo sistema fechado, pois a alimentação de ar pode ocorrer tanto num sentido quanto em outro.

Com os cuidados vistos anteriormente para eliminação do condensado, como secadores, permanece uma umidade residual, a qual deve ser removida ou até mesmo eliminada, em caso de condensação da mesma. Para que a drenagem eventual seja feita, devem ser instalados drenos (purgadores), que podem ser manuais ou automáticos, com preferência para o último tipo (Gresh, 2007).

Ainda segundo Gresh (2007), os pontos de drenagem indicados na Figura 17, devem se situar em todos os locais baixos da tubulação, fim de linha, onde houver elevação de linha, etc. Nestes pontos, para auxiliar a eficiência da drenagem, podem ser construídos bolsões, que retêm o condensado e o encaminham para o purgador. Estes bolsões, construídos, não devem possuir diâmetros menores que o da tubulação. O ideal é que sejam do mesmo tamanho.

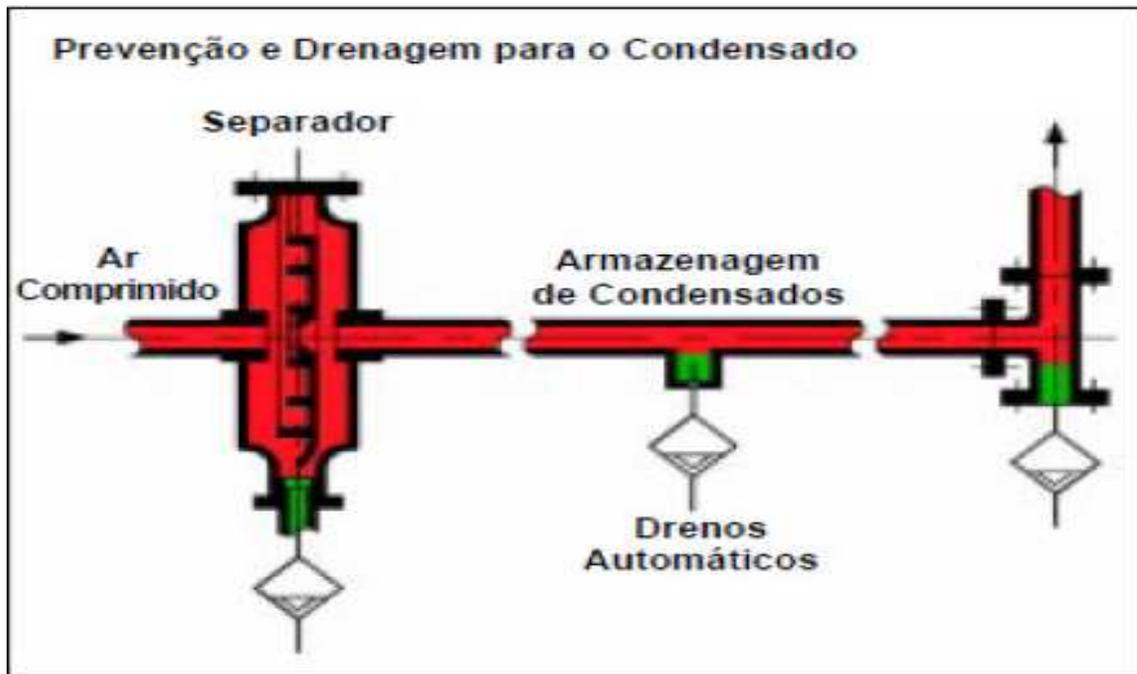


Figura 17 – Drenos de Condensados.

Como mencionado, restará no ar comprimido uma pequena quantidade de vapor de água em suspensão e os pontos de drenagem comuns não conseguirão provocar sua eliminação. Com este intuito, podem ser instalados separadores de

condensado, cujo princípio de funcionamento é simples: obrigar o fluxo de ar comprimido a fazer mudanças de direção; o ar muda facilmente, porém as gotículas de umidade chocam-se contra os defletores e neles aderem, formando gotas maiores, que escorrem para o dreno. A Figura 18 apresenta um modelo de dreno (Gresh, 2007).

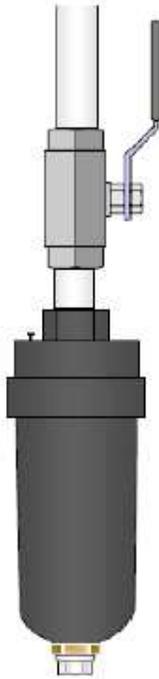


Figura 18 – Dreno de Condensados.

### 2.4.3 Consumo Final

Outro ponto que deve ser bem analisado no sistema de ar comprimido é o consumo final ou utilização final, que representa a maior fonte de desperdícios, seja pelas instalações deficientes, ou seja, pela má utilização do ar comprimido.

As tomadas de ar comprimido devem ser sempre feitas pela parte superior da tubulação principal, para evitar os problemas de condensado já expostos (Figura 19). Recomenda-se ainda que não se realize a utilização direta do ar no ponto terminal do tubo de tomada. No terminal, deve-se colocar uma pequena válvula de drenagem e a utilização deve ser feita um pouco mais acima, aonde o ar, antes de ir

para a máquina, passa através da unidade de condicionamento (Training Park, 2000).

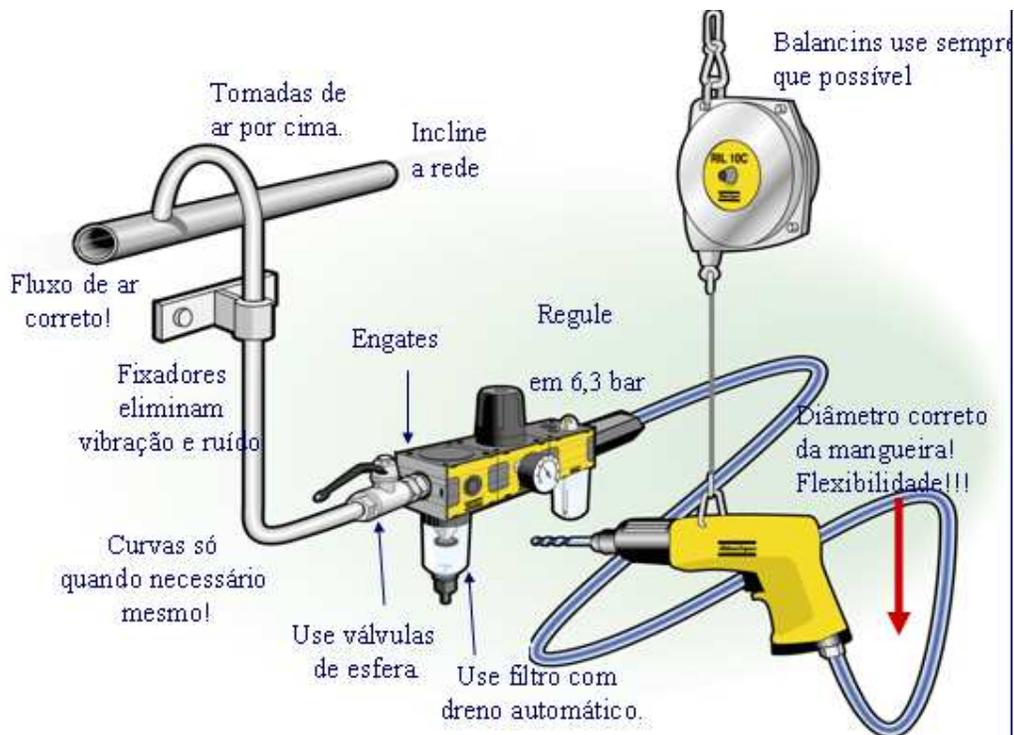


Figura 19 – Tomada de Ar na Rede de Ar Comprimido  
Fonte: Atlas Copco.

Os problemas mais encontrados na utilização final do ar comprimido são:

- Perda de capacidade de ar;
- Potência de ferramentas pneumáticas diminuída;
- Desgaste prematuro de ferramentas;
- Presença de impurezas e água na rede.

Todos estes problemas são causados principalmente pelos vazamentos, que por sua vez são os maiores causadores de quedas de pressão na rede.

#### 2.4.3.1 Vazamentos

Vazamento é um item que na maioria das instalações tem grande importância. Normalmente os vazamentos estão localizados no terminal do ponto

consumidor, tanto nas conexões, mangueiras e engates, como nas juntas que ligam os diferentes componentes do sistema.

Na rede, estes vazamentos aparecem em tubulações deterioradas, nas conexões, válvulas e juntas de tubos.

Quando o vazamento se processa nas instalações do compressor, o trabalho de reparo é quase sempre feito nas válvulas de segurança, manômetros, registros ou juntas de tubulação.

Os vazamentos afetam diretamente no consumo de energia do compressor, e necessitam ser eliminados por completo. Não é raro encontrar sistemas de ar comprimido com perda de 33% da energia gerada pelo compressor.

Um vazamento é um consumo contínuo de ar. As ferramentas e instalações, muitas vezes têm consumo intermitente, o que torna o problema mais grave. Um pequeno vazamento contínuo pode significar o trabalho de várias ferramentas de uso intermitente, todo o dia.

As quantidades de ar perdidas através de pequenos furos, acoplamentos com folgas, vedações defeituosas, etc., quando somadas, alcançam elevados valores. A importância econômica desta contínua perda de ar torna-se mais evidente quando comparada com o consumo de um equipamento e a potência necessária para realizar a compressão. Desta forma, um vazamento na rede representa um consumo consideravelmente maior de energia, que pode ser verificado através da Tabela 05. É impossível eliminar por completo todos os vazamentos, porém estes devem ser reduzidos ao máximo com uma manutenção preventiva do sistema, de 3 a 5 vezes por ano, sendo verificados, por exemplo: substituição de juntas de vedação defeituosa, engates, mangueiras, tubos, válvulas, aperto das conexões, restauração das vedações nas uniões roscadas, eliminação dos ramais de distribuição fora de uso e outras que podem aparecer, dependendo da rede construída (Training Park, 2000).

Diâmetro do furo (mm)	Perda (l/s) a 7 bar	Potência Perdida (kW)	Consumo Anual (kWh)	Custo da perda/ano R\$
0,8	0,2	0,1	876	105,12
1,0	1,0	0,3	2628	315,36
1,5	3,1	1,0	8760	1051,20
3,0	11,0	3,5	30660	3679,20
5,0	26,7	8,3	72708	8724,96
6,0	45,8	15,0	131400	15768,00
10,0	105,0	33,0	289080	34689,60

**Considerando 1kWh = R\$ 0,12**

Tabela 05 – Custo do Desperdício Através de Vazamentos  
Fonte: Atlas Copco, 2006.

Um sistema de ar corretamente equipado, e com uma manutenção adequada, não apresenta em média um vazamento superior a 5% de sua capacidade instalada, segundo o fabricante Atlas Copco.

Ainda segundo a Atlas Copco, perdas de 15 a 20%, ou mais, são comuns através de vazamentos excessivos, equipamentos obsoletos, falhas de manutenção, etc.

Como exemplo, uma mangueira aberta de 3/8”(10mm) corresponde a um fluxo contínuo de 105 l/s (220cfm) requer uma potência de aproximadamente 37 kW, ou seja o suficiente para acender 370 lâmpadas de 100 W.

Os vazamentos podem causar os seguintes problemas tanto no sistema de produção quanto na saúde das pessoas:

- Diminuição do volume de ar disponível;
- Aumento no consumo de energia;
- Redução na potência das ferramentas pneumáticas;
- Desgaste prematuro de ferramentas;
- Presença de impurezas e água na rede;
- Queda de pressão;
- Rompimento de tímpano;
- Perda auditiva pela exposição ao ruído;

- Lançamento de pequenos corpos a altas velocidades transformando-os em mini projéteis;
- Lesão do globo ocular;
- Muita gente não sabe, mas a maioria dos compressores industriais são lubrificados e arrastam de 3 mg a 5 mg de óleo para cada metro cúbico de ar comprimido;
- Irritações das vias aéreas pela presença de óleo e impurezas no ar respirado.

#### 2.4.3.2 Queda de pressão do ar comprimido

Na utilização final do ar comprimido um dos maiores problemas para as ferramentas pneumáticas ou equipamentos que utilizam o ar comprimido é a queda de pressão.

Uma queda de pressão de 6 para 5 bar diminui a potência da ferramenta em 25% e para 4 bar reduz a potência em 49%, ou seja, a queda da pressão diminui o rendimento das ferramentas pneumáticas, aumentando o custo da produção.

Uma queda de 0,5 bar causa:

- aumento de 19 % no tempo de esmerilhamento;
- aumento de 62% no tempo de furação;
- aumento de 7% no tempo para atingir torque das chaves de impacto.

Fonte: Atlas Copco, Distribuição de Ar, número: 15, ano: 2.002.

Os equipamentos comerciais pneumáticos são especificados para funcionar à 6 bar de pressão. Qualquer diminuição na pressão de alimentação poderá reduzir drasticamente sua eficiência. (Fonte: Atlas Copco, Distribuição de Ar, número: 15, ano: 2.002).

Por outro lado, os compressores comerciais têm como pressão padrão 7 bar, o que erroneamente nos induz a pensar que podemos perder 1 bar na distribuição.

Entre o compressor e a utilização temos as redes principais e redes secundárias de distribuição, com todas suas peças, como válvulas, filtros, etc; estes conjuntos de redes primárias e secundárias poderão perder somente 0,35 bar de pressão para que o sistema opere satisfatoriamente.

Uma perda maior de pressão poderá ser devido à:

- 1 - Sistema de distribuição subdimensionado;
- 2 - Vazamentos (que ocasionam queda de pressão);
- 3 - Filtros entupidos, válvulas quebradas, incrustações;
- 4- Condensado obstruindo linha (purgadores travados).

Os vazamentos e filtros entupidos são resolvidos facilmente com uma manutenção regular do sistema, com inspeções periódicas. Estas inspeções, depois de certo tempo tendem à relaxar-se, é preciso fazer de tempos em tempos, uma auditoria no sistema.

Mas geralmente a principal causa de queda de pressão é devida a um subdimensionamento das linhas, ou mesmo à aumentos sucessivos de demanda que deixam as linhas de distribuição subdimensionadas.

O Gráfico 04 representa um exemplo de má distribuição de ar.

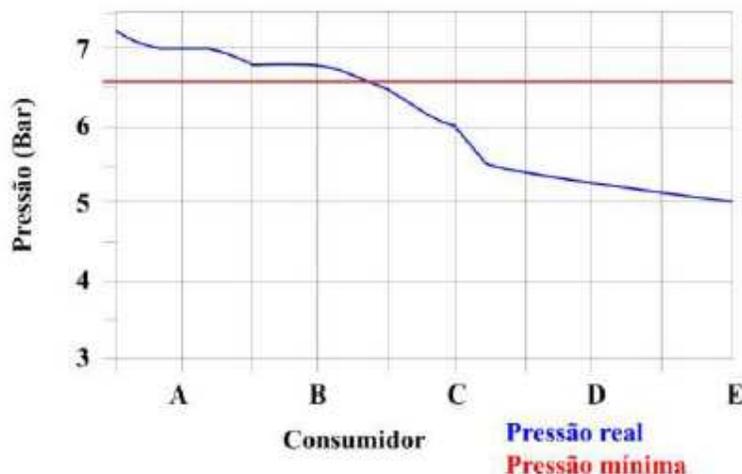


Gráfico 04 – Exemplo de Queda de Pressão na Rede

Fonte: Artigo da CSE – Consultoria e Serviços de Engenharia, disponível no site: <http://pt.scribd.com/doc/22252896/Manual-do-ar-comprimido>.

Nas auditorias realizadas nas redes de ar comprimido em fábricas no Brasil, 70% das instalações apresentam problemas de desperdício de ar, e graves falhas na distribuição. (Fonte: Atlas Copco).

As ferramentas pneumáticas são construídas para oferecer um rendimento máximo a uma pressão de 6 bar (87 lbs/sq inch).

O emprego de uma mangueira bastante longa, duas ou mais ferramentas na mesma linha, configuram o mau desempenho com desperdício de energia.

A queda de pressão ideal permitida entre a instalação do compressor e o ponto de consumo, não deve exceder 5% da pressão gerada; isto é facilmente determinado pela diferença da medida da pressão na saída do compressor e no ponto de utilização.

As quedas de pressão podem ter origem no subdimensionamento do projeto ou vazamentos nos condutos de distribuição do ar.

O subdimensionamento ocorre quase sempre quando é desconhecida a vazão necessária de ar ou quando este consumo supera progressivamente a capacidade do compressor ou a capacidade de distribuição.

Ainda existe a possibilidade de se encontrar perdas de pressão excessiva em somente parte do circuito.

O método mais eficaz de determinar o subdimensionamento é sem dúvida a medição da pressão no compressor e pontos de utilização, determinando para cada ramal a vazão ou mesmo ainda, medindo a vazão que sai do compressor, na rede mestra.

Outro causador da queda de pressão na rede são as tubulações e seus equipamentos subdimensionados, como já citados, ou instalados erroneamente. Quando a fábrica necessita de ampliações, a rede de ar geralmente não é redimensionada e os aumentos de rede são realizados de forma desordenada e desorganizada. A Tabela 06 demonstra os vários equipamentos de uma tubulação de ar comprimido e sua equivalência em queda de pressão.

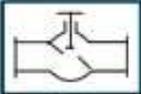
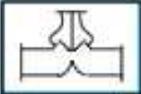
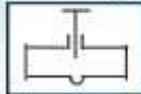
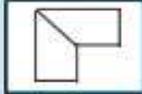
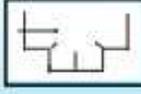
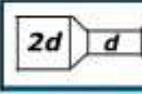
<b>Válvula de controle</b>  0,044 Bar*	<b>Válvula diafragma</b>  0,012 Bar	<b>Válvula gaveta</b>  0,003 Bar	<b>Cotovelo</b>  0,015 Bar
<b>Curvas R = d</b>  0,003 Bar	<b>Curvas R = 2d</b>  0,015 Bar	<b>T's, mangueiras</b>  0,019 Bar	<b>Redutores</b>  0,005 Bar

Tabela 06 – Equivalências dos Componentes das Tubulações com queda de pressão

Fonte: site: BlogAr - <http://mktproject.com.br/blogar/>.

A troca de uma linha subdimensionada custa muito mais do que a instalação de uma que já preveja futuras expansões e necessidades de consumo. Dependendo

da idade que a linha de distribuição tiver que aguentar, é bem mais econômico já considerar a perda que acontecerá conforme a idade:

- instalações com até 7 anos de idade e em bom estado de conservação: não superior a 5%;

- instalações com até 7 anos de idade e em estado precário: de 5 a 10%;

- instalações com idade entre 7 e 15 anos e em estado regular: de 10% a 15%.

(Fonte: site: BlogAr - <http://mktproject.com.br/blogar/>).

A perda da pressão pode representar cerca de 75% do custo de vida do sistema de distribuição, portanto o ditado “é melhor prevenir do que remediar”, vale mais do que nunca.

Existe uma relação entre a pressão, vazão e o diâmetro da rede. O diâmetro deverá ser maior quanto menor for a pressão e maior for o volume.

A perda de carga considerada no projeto de uma rede de ar é 0,1 bar.

A Figura 20 mostra uma fórmula para verificar se o diâmetro da tubulação está de acordo com o sistema de geração.

$$\text{Diâmetro interno} = \sqrt[5]{\frac{\text{Coeficiente de atrito} \times \text{Comprimento da rede} \times \text{Vazão}^{1,85}}{\Delta_p \times \text{Pressão absoluta mínima}}}$$

Unidades empregadas na fórmula acima:

Diâmetro interno da tubulação em “mm”

Coeficiente de atrito = “número adimensional” = 450 (aço carbono) e 280 (alumínio)

Comprimento da rede = “m”

(Não é o perímetro! É sim a maior distância entre a geração e o consumo. Não esquecer de considerar a singularidade)

Vazão = “l/s”

$\Delta p$  = “bar” – geralmente o projeto é feito considerando 0,1bar

Pressão absoluta mínima = barg

Figura 20 – Fórmula para dimensionamento de tubulações

Fonte: site: BlogAr - <http://mktproject.com.br/blogar/>.

O Gráfico 05 demonstra o aumento do consumo de energia na geração de ar comprimido relacionado ao aumento de pressão na geração dos compressores.

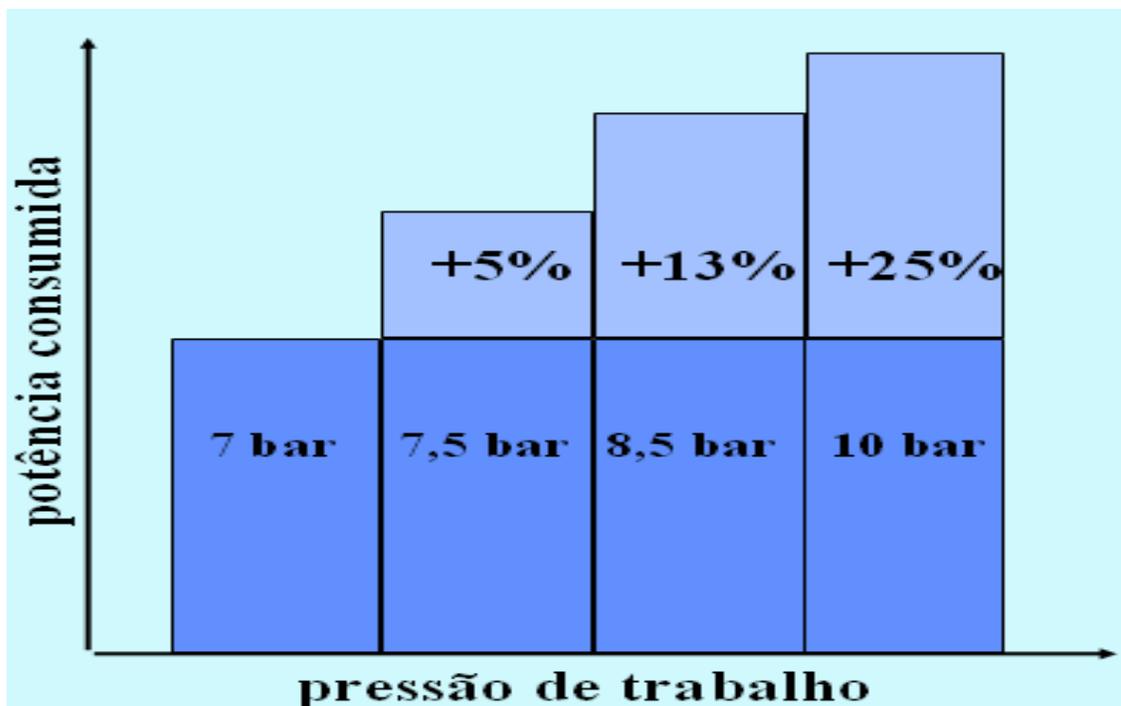


Gráfico 05 – Relação entre Aumento de Pressão e Aumento no Consumo de Energia na Geração de Ar Comprimido

Fonte: Atlas Copco, 2006.

A eficiência do sistema de ar comprimido pode ser medida através de uma fórmula, onde se relacionam os quadrados das pressões de consumo e geração, esta relação ao ser multiplicada por 100 representa a eficiência da rede de ar comprimido em percentual, como ilustrado na Figura 21.

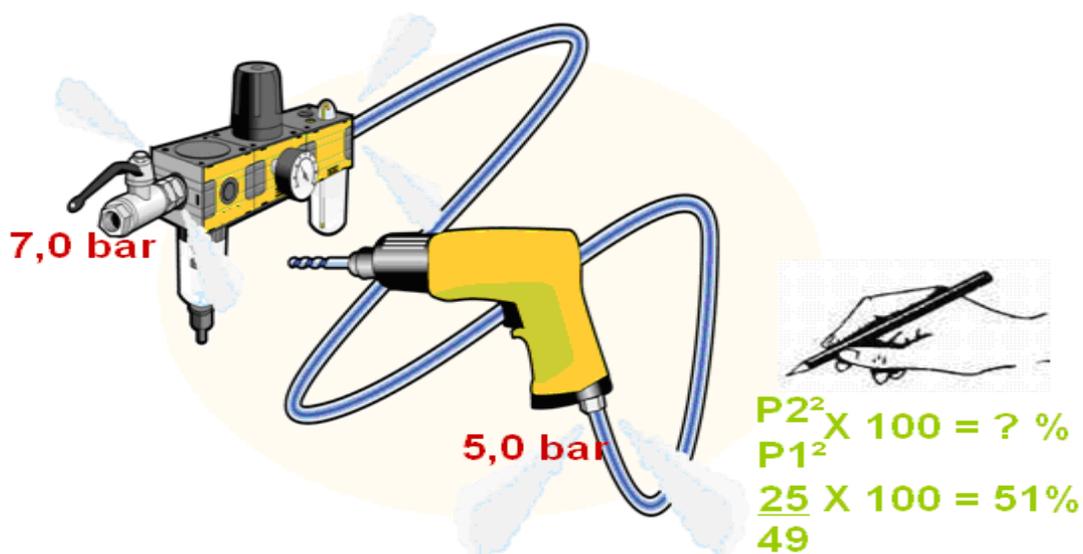


Figura 21 – Fórmula para Cálculo da Eficiência da Rede de Ar Comprimido

Fonte: Atlas Copco, 2006.

### **3 TRABALHO PROPOSTO: AUDITORIA NA REDE DE AR COMPRIMIDO**

Aparentemente uma instalação de ar comprimido não guarda segredos quanto à sua forma de funcionamento e à quantidade e tipos de equipamentos empregados em sua execução.

Um sistema completo de ar comprimido possui três componentes principais: os compressores, uma rede de distribuição central e as tubulações secundárias, conforme vimos nos capítulos anteriores.

Evidentemente estes três componentes comportam válvulas, filtros separadores de água, purgadores, engates rápidos, etc.

Uma das condições fundamentais para que qualquer equipamento de ar comprimido opere satisfatoriamente é a alta qualidade das instalações.

A grande função da auditoria na rede de ar comprimido é realizar, de uma forma profissional e organizada, um levantamento geral de como está todo o sistema e fornecer soluções para que os equipamentos de utilização final operem de uma forma satisfatória e não se tenha paradas de produções inesperadas. Indiretamente, a economia de energia e o retorno financeiro aparecerão com as ações utilizadas.

Por experiência e auditorias já realizadas pela empresa Atlas Copco, pode-se dizer que em média:

- 63% de toda energia utilizada no processo de compressão é desperdiçada;
- 50% desta energia desperdiçada pode ser evitada;
- 25% somente com procedimentos operacionais;
- 20% com grandes investimentos;
- 5% com pequenos investimentos.

Porém, todos estes investimentos possuem altas taxas de retorno.

A Tabela 07 demonstra alguns aspectos que devem ser analisados em uma auditoria da rede de ar comprimido.

### RESUMO - AUDITORIA DE ENERGIA

OS GASTADORES	PARÂMETRO ACEITÁVEL	CORREÇÃO
Filtro de Ar da Sucção dos compressores	Dp= 150 mmCA	Limpeza periódica troca ou projeto deficiente.
Refrigeração dos cilindros. Resfriador intermediário inter cooler.	Temp.do ar na saída: 11 °C superior a entrada de água	Limpeza mecânica para tirar incrustação. Aumento da quantidade de água de refrigeração.
Resfriador Posterior after cooler.	8 a 9°C acima da temp. de entrada da água de refrigeração.	Limpeza mecânica para tirar incrustação. Aumento da quantidade de água de refrigeração.
Projeto inadequado Aumento do Consumo além do previsto inicialmente.	De acordo com o projeto 30%	Instalar novas linhas; partindo da linha mestra ou mesmo do vaso pulmão
Mais de 1 ferramenta pneumática ligada em 1 ramal.	1 ferramenta por linha calculada para ela.	Fazer novas tomadas na linha mestra
Mangueira excessivamente longa.	Ocasiona 3 a 4 vezes a perda equiva lente a tubo de aço.	Usar o mínimo comprimento necessário. Fazer o uso da mangueira uma excessão
Vazamentos em juntas engates, válvulas de bloqueio, válvulas de alívio	Ideal é não ter vazamentos.	Inspeção regular de toda linha e correção dos problemas encontrados.
Perda de carga em fil tros de linha	Filtro sujo pode provocar perdas de até 30 KPA	Limpá-los periódica mente
Vazamentos internos em ferramentas pneumáticas.	O melhor é não ter vazamentos pois a fetam a performance do equipamento	Revisão periódica testes pneumáticos de estanqueidades
Má remoção de água na rede de distribuição.	De acordo com a aplicação do ar.	Instalação de elimi nadores de água. Potes nas pontas baixas e purgadores. Inclinação da tubulação <1% no sentido do fluxo.

Tabela 07 – Aspectos a serem analisados na auditoria da rede de ar comprimido  
 Fonte: Artigo da CSE – Consultoria e Serviços de Engenharia, disponível no site:  
<http://pt.scribd.com/doc/22252896/Manual-do-ar-comprimido>.

A decisão de se realizar uma auditoria na rede de ar comprimido por uma empresa especializada no setor é devido ao fato de não se possuir todas as ferramentas necessárias para as análises como: medidor ultrassônico, equipamento para medição de rendimento e medidor de grandezas elétricas.

O trabalho consiste em analisar todo o sistema de ar comprimido da planta industrial da Renault do Brasil, a qual consiste em avaliar os três grandes subsistemas do sistema: geração de ar comprimido, distribuição de ar comprimido e consumo final do ar comprimido.

Para a geração é realizada uma verificação da sala de compressores e analisado todo o plano de manutenção preventiva dos compressores. Também é realizado um cálculo do rendimento das máquinas para verificar a necessidade de repotencializar as mesmas.

Para a distribuição é feita uma análise da rede de ar comprimido, estudando-se alternativas de alteração de alguns pontos da rede de forma que estes deixem de ser potenciais consumidores de energia, como, restrições, curvas, etc.

Para o consumo final, o principal trabalho é a medição de vazamentos de ar através de um medidor ultrassônico, que permite identificar e quantificar as perdas de ar. Também é realizado um grande programa de conscientização da utilização do ar comprimido.

A seguir serão descritas as análises e verificações que devem ser realizadas em uma auditoria no sistema de ar comprimido.

### 3.1 GERAÇÃO

#### 3.1.1 Temperatura de Aspiração dos Compressores

Quanto mais baixa for a temperatura de aspiração de um compressor, menor será a energia necessária para sua compressão. Como indicação, pode-se dizer, aproximadamente, que: para cada 4°C de aumento na temperatura do ar de aspiração, o consumo de energia aumenta em 1% para obter o mesmo volume gerado; e para cada 3°C de redução da temperatura do ar aspirado, verifica-se aumento de 1% da capacidade do compressor para o mesmo consumo.

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. Então, maior massa de ar poderá ocupar o mesmo volume do que quando ele está mais aquecido. Portanto, é importante sempre na análise, verificar onde deve ser realizada a aspiração do ar para os compressores, se dentro da sala ou fora da mesma.

Caso a opção viável seja a captação do ar externo, deve-se tomar o cuidado com o duto de aspiração, pois este deve ser curto, reto e de grande diâmetro, e o filtro na entrada deverá ser mantido sempre limpo, para que a perda de carga na aspiração seja a menor possível. Para cada 25 mbar de queda de pressão na aspiração, o rendimento global do compressor é reduzido em 2%.

Nas instalações onde o compressor é resfriado a ar, também é usual lançar para o exterior o ar aquecido do resfriamento. Deve-se tomar cuidado para que este ar não aqueça o ar de aspiração do compressor. A Tabela 08 correlaciona as

temperaturas do ar aspirado e os percentuais de potência economizados ou incrementados tomando-se como base à temperatura de 21°C. Para valores diferentes dos citados na tabela, os valores podem ser interpolados.

TEMPERATURA DO AR DE ASPIRAÇÃO (°C)	PERCENTUAL DE POTÊNCIA ECONOMIZADA, OU INCREMENTADA, COM REFERÊNCIA À TEMPERATURA DE 21°C
-1,0	7,5 (economizado)
4,0	5,7 (economizado)
10,0	3,8 (economizado)
16,0	1,9 (economizado)
21,0	0,0
27,0	1,9 (incrementado)
32,0	3,8 (incrementado)
38,0	5,7 (incrementado)
43,0	7,6 (incrementado)
49,0	9,5 (incrementado)

Tabela 08 – Consumo de Potência com relação a Temperatura do Ar Aspirado  
Fonte: Procel, 2005.

### 3.1.2 Verificação do Sistema de Manutenção dos Compressores

Tal como ocorre com os equipamentos eletromecânicos, os sistemas de ar comprimido industrial necessitam de manutenção periódica para operar com eficiência elevada e minimizar as paradas não programadas. A manutenção inadequada pode aumentar o consumo de redução de eficiência de compressão, vazamentos ou oscilações na pressão.

Também pode acarretar altas temperaturas de operação, deficiente controle de umidade, contaminação excessiva e um ambiente de trabalho inseguro. Muitos problemas são secundários e podem ser corrigidos com simples ajustes, limpeza, substituição de peças ou eliminação de condições adversas. A manutenção de um sistema de ar comprimido é similar à realizada em carros. Filtros e fluidos devem ser

trocados, a água de refrigeração deve ser inspecionada, correias devem ser ajustadas e vazamentos devem ser identificados e consertados.

Um bom exemplo de custo excessivo devido a uma manutenção inadequada pode ser visto no uso de filtros, pois quando estão sujos aumentam a queda de pressão, o que reduz a eficiência do compressor.

Com um filtro coalescente sujo (não substituído no intervalo regular), a queda de pressão através do filtro poderia aumentar para 0,4 bar, o que deveria ser 0,1 bar quando limpo, resultando em uma necessidade de aumento na pressão do sistema. A queda de pressão de 0,3 bar acima da queda normal de 0,1 bar eleva em cerca de 2% os custos anuais de energia do sistema ar comprimido.

Todos os componentes de sistema de ar comprimido devem sofrer manutenção de acordo com as especificações dos fabricantes. Os fabricantes fornecem programação de inspeção, manutenção e de serviços, que deveriam ser rigorosamente seguidos. Por isso, os intervalos especificados pelo fabricante têm como objetivo, primeiramente, proteger o equipamento, mais do que otimizar a eficiência do sistema. Em muitos casos, é conveniente realizar as manutenções nos equipamentos de ar comprimido com maior frequência, dependendo do ambiente onde a sala dos compressores está instalada, esta é uma das grandes funções do auditor.

Uma forma de saber se um sistema de ar comprimido está em boas condições de manutenção e operando eficientemente consistem em, periodicamente comparar com a base de referência o consumo de potência, pressão, vazão de ar e temperatura. Se o consumo de potência para uma dada pressão e vazão aumenta, a eficiência do sistema está declinando. Referenciar o sistema também indicará se o compressor está operando à plena capacidade e se sua capacidade está diminuindo com o passar do tempo. Em um novo sistema, as especificações devem ser bem guardadas quando o sistema é instalado pela primeira vez e opera corretamente.

Para assegurar o máximo de desempenho e tempo de serviço para os compressores, uma rotina programada de manutenção precisa ser elaborada e seguida. Uma correta manutenção requer procedimentos diário, semanal, mensal, quadrimestral, semestral e anual. A excelência na manutenção é fator chave para aumentar a disponibilidade e confiabilidade de um sistema de ar comprimido, reduzindo o consumo de energia, economizando tempo, cortando custos operacionais e melhorando a produtividade da fábrica e a qualidade dos produtos.

A seguir algumas dicas:

1 - Compressores alternativos de pequeno porte, geralmente entre 1,5 e 30hp (1,1 a 22kW), exigem a substituição periódica dos filtros de ar de admissão, filtros de óleo e o próprio óleo. O nível de óleo deve ser verificado, no mínimo, diariamente. As válvulas de admissão e de descarga também devem ser substituídas. A frequência de substituição destas válvulas depende do número de horas de funcionamento e da temperatura. Motores elétricos ou a combustão também necessitam de manutenção periódica; (Fonte: site: BlogAr - <http://mktproject.com.br/blogar/>).

2- Compressores rotativos também exigem manutenção periódica. Isso geralmente envolve a verificação dos níveis de lubrificante, substituição do filtro de ar/óleo e do elemento separador. O tempo de troca do óleo pode variar entre 1.000 a 8.000 horas, dependendo do tipo de óleo, projeto do compressor e condições de operação. (Fonte: site: BlogAr - <http://mktproject.com.br/blogar/>).

O uso de óleo sintético em compressores reduz o consumo de energia de 2% a 5%, além de oferecer outros benefícios em relação ao óleo mineral, tais como: vida útil do óleo de até 8000 horas (equivalente a 7 trocas do óleo mineral), diminuição de depósitos de carbono e vernizes, temperatura do óleo mais baixa, temperatura de descarga do ar comprimido mais baixa, menor consumo de óleo, menor arraste de óleo na descarga; e menor ruído e vibrações. Recomenda-se que esta medida seja analisada em conjunto com o fabricante do compressor, para que se possa verificar sua aplicabilidade, bem como sua compatibilidade com os materiais do compressor e o fator econômico; (Fonte: site: BlogAr - <http://mktproject.com.br/blogar/>).

3- A rotina de manutenção preventiva é uma ferramenta útil para realizar as inspeções necessárias e programar as manutenções que irão minimizar perturbações na operação da planta; (Fonte: site: BlogAr - <http://mktproject.com.br/blogar/>).

4- Contratos de manutenção podem também ser um bom aliado para os usuários de compressores, que podem planejar os gastos com a manutenção dos equipamentos. (Fonte: site: BlogAr - <http://mktproject.com.br/blogar/>).

### 3.1.3 Regulagem da Pressão dos Compressores

A pressão de trabalho é um fator crítico, pois afetará significativamente o consumo de energia, que aumenta com o aumento da pressão de trabalho. Equipamentos que operam com diferentes pressões em uma mesma instalação podem ser atendidos mediante a redução da pressão nos pontos de consumo, por meio de válvulas redutoras. Algumas vezes, torna-se econômico o uso de compressores de diferentes vazões e pressões para atender a diferentes solicitações de operação, em um mesmo sistema.

A pressão de trabalho da instalação é definida pela pressão que atenda aos requisitos dos equipamentos consumidores mais as perdas da rede entre a geração e o consumo. Devem-se levar em conta o projeto e o traçado das tubulações da distribuição, os filtros usados, as válvulas, os secadores de ar, etc. A pressão escolhida deverá ser a menor que possa vencer todos os obstáculos ao fluxo do ar pelas tubulações e que atenda os consumidores segundo as condições exigidas pelo seu fabricante.

A pressão de trabalho é regulada pelo ajuste do sensor de pressão de controle carga / alívio do compressor. Deverá estar próxima da pressão média de operação da linha. Um ajuste de pressão mais elevada leva o compressor a funcionar mais tempo que o necessário (e dependendo do valor deste ajuste, não entrar em alívio em nenhum momento), fato que poderá incorrer em elevações substanciais no consumo de energia elétrica.

De modo geral, os projetos consideram uma diferença de no máximo 0,8 bar entre a pressão média de trabalho no ponto mais distante do sistema e a pressão que se ajusta no sistema de regulagem de controle. Essa diferença corresponde às perdas de carga máximas normalmente adotadas em projetos de sistemas de ar comprimido para os pontos de alimentação mais distantes, levando-se em conta situações críticas (fatores de segurança).

O aumento de 1 bar no ajuste da pressão do sistema leva a um aumento de 6% a 10% na potência consumida pelos motores dos compressores, para pressões em torno de 6 a 7 bar (Fonte: site: BlogAr - <http://mktproject.com.br/blogar/>).

### 3.1.4 Medição de Rendimento dos Compressores

Uma análise muito importante e muitas vezes desprezada é a medição do rendimento dos compressores, tal importância deve-se ao fato de saber se a potência do compressor que está sendo utilizado está realmente sendo utilizada para a vazão nominal da máquina.

Como exemplo adote um compressor de 900 kW que possui uma vazão nominal de 1.939 l/seg., e considere que esta máquina trabalhe com um rendimento de 90 %, ou seja, uma vazão de 1.739 l/seg. Esta vazão corresponde a um compressor de 750 kW, ou seja, desta forma o sistema está consumindo 900 kW para realizar o trabalho que poderia ser realizado com um compressor de 750 kW, desperdício de 150 kW na geração de ar comprimido (estes dados são retirados dos manuais dos equipamentos).

A medição do rendimento é feita com o uso de uma ferramenta conectada à saída do compressor. Esta ferramenta possui orifícios calibrados instalados de acordo com a vazão de cada máquina, instalam-se sensores de temperatura e pressão, para medir o ar de descarga, e assim calcular a vazão real de cada compressor. Com isso é possível identificar o rendimento das máquinas. Na Figura 22 está demonstrada a ferramenta para medição do rendimento dos compressores.



Figura 22 – Ferramenta de Medição de Rendimento dos Compressores  
Fonte: Autoria Própria.

### 3.1.5 Medição de Corrente dos Compressores

Da mesma forma que a medição de rendimento dos compressores, o monitoramento da corrente dos compressores é muito importante, pois através da análise desta muitos problemas podem ser constatados ou evitados.

Com o monitoramento da corrente elétrica dos compressores pode-se detectar problemas no funcionamento do motor elétrico, sobrecarga no motor elétrico causado pela restrição dos filtros (ar, óleo) dos compressores. Todos estes itens causam desperdício de energia elétrica e custos de manutenção.

Para este monitoramento é utilizado um medidor de corrente elétrica com TC's em cada uma das fases do compressor, este procedimento é realizado para registrar os períodos de carga e alívio das máquinas. Com essa medição é possível, também, traçar o perfil de consumo e realizar simulações, para verificar como estão os trabalhos dos compressores, por exemplo, se uma máquina está trabalhando por

muito tempo em alívio, deve-se regular sua pressão ou realizar um estudo para troca desta máquina, pois o ideal é que a máquina trabalhe o maior tempo em carga.

## 3.2 DISTRIBUIÇÃO

### 3.2.1 Verificação da Tubulação

Na distribuição as atenções devem estar voltadas às medições das quedas de pressão. E este assunto é abordado no capítulo 2.4.3.2 - Queda de Pressão do Ar Comprimido.

As perdas de carga tornam o sistema mais econômico ou não. Isto dependerá da escolha dos acessórios de rede (curvas, válvulas, filtros etc.) e do dimensionamento das tubulações.

Para cada 0,25 bar de aumento na pressão do sistema para compensar as perdas de carga (filtros + secador + tubulação), consome-se 1,5% de potência a mais no compressor. (Fonte: site: BlogAr - <http://mktproject.com.br/blogar/>).

A pressão de trabalho dos equipamentos e dispositivos consumidores de ar comprimido especificada pelo fabricante deve ser respeitada. A eficiência de um equipamento ou dispositivo pneumático cai bruscamente se a pressão de fornecimento do sistema cai abaixo de suas pressões de trabalho especificadas.

Em certas aplicações, as pressões de trabalho necessárias para o acionamento de vários consumidores são bem diferentes. Uma situação como esta deve ser examinada com mais profundidade, para uma solução mais econômica. É o caso de alguns poucos equipamentos com consumo baixo de ar comprimido, mas que necessitam de pressões de trabalho bem maiores que os outros equipamentos que estão em maior quantidade. Nesse caso, um compressor pequeno secundário pode ser instalado para atender em rede separada, com pressão de desligamento mais alta. Normalmente, o aumento da pressão de trabalho para atender a todos os equipamentos é antieconômica. A melhor solução consiste em separar as redes e instalar compressores menores para atender os casos especiais.

Na Figura 23 está demonstrado um sensor de pressão pontual que pode ser instalado em pontos diferentes da rede de ar comprimido para a medição da

pressão, ele também pode ser utilizado para detectar quedas de pressão em pontos distintos.

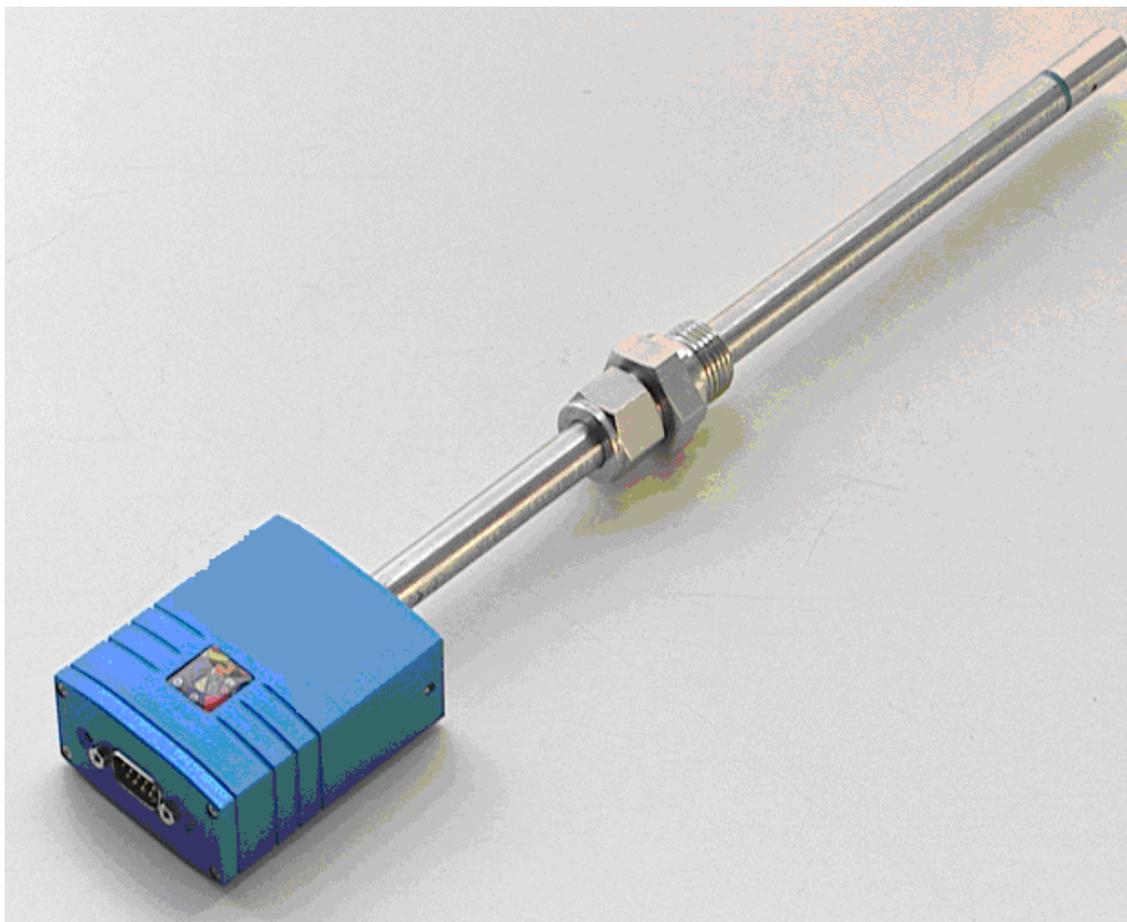


Figura 23 – Sensor de Pressão de Ar Comprimido  
Fonte: Autoria Própria.

### 3.3 CONSUMO FINAL

#### 3.3.1 Medição de Vazamentos

A verificação dos vazamentos talvez seja o trabalho mais significativo para aumentar a eficiência do sistema de ar comprimido e que também pode trazer o maior retorno financeiro.

Este assunto está bem explicado no capítulo 2.4.3.1 - Vazamentos.

Neste capítulo serão demonstradas algumas formas de verificação / medição dos vazamentos.

#### 3.3.1.1 Medidor ultrassônico

Através de um equipamento de detecção ultrassônico é possível quantificar os vazamentos existentes na rede de ar comprimido, a grande vantagem deste sistema perante os demais é que além de verificar a quantidade de vazamentos pode-se também detectar os pontos de vazamento.

Sons e ruídos extremamente graves ou agudos podem passar despercebidos pelo aparelho auditivo humano, não por deficiência deste, mas por caracterizarem vibrações com frequências muito baixas, até 20HZ (infrassom) ou com frequências muito altas acima de 20 kHz (ultrassom), ambas inaudíveis.

Como sabemos, os sons (música) produzidos em um ambiente quaisquer, refletem-se ou reverberam nas paredes, podendo ainda ser transmitidos a outros ambientes.

Fenômenos como este apesar de simples e serem frequentes em nossas vidas cotidianas constitui os fundamentos do ensaio com detector ultrassônico.

Assim como uma onda sonora reflete ao incidir num anteparo qualquer, a vibração ou onda ultrassônica ao percorrer um meio elástico (exemplo: AR), parte dela refletirá da mesma forma atenuando rapidamente sendo outra parte será absorvida e transmitida por diante com menor intensidade.

Através de aparelhos especiais (Detector Ultrassônico), identificamos as transmissões e reflexões provenientes da fonte geradora Ultrassônica.

O objetivo primário de um dispositivo de audição ultrassônica é converter sons de alta frequência inaudíveis (ultrassons) em sons audíveis correspondentes que mantém a mesma qualidade representativa que o som original. Como a intensidade e o tom do ultrassom não mudam, a resposta audível em proporção é direta.

Você pode testemunhar este som proporcional pela fricção de sua mão no outro lado de uma superfície de um objeto que seu instrumento estiver inspecionando. Neste exemplo você pode ouvir a variação de sons audíveis produzidos pela sua mão e também ultrassons convertidos pelo seu instrumento para sons audíveis representativos. Você notará que a qualidade e a natureza dos

sons que você ouvir e os ultrassons reproduzidos pelo detector ultrassônico são muito similares. Em outras palavras, todos os moldes ultrassônicos são exatamente convertidos para sons audíveis representativos.

Muitos sons ocorrem além de uma ampla faixa de frequências, ambas abaixo e acima da faixa da audição humana, que é geralmente correspondida para ser de 20 a 20.000 Hz, conforme mencionado anteriormente. De qualquer modo, quase todos os sons de atrito, descargas elétricas, e vazamento de fluidos pressurizado (líquidos ou gases) tem pico de produção próximo à faixa de 40 KHZ. As frequências na faixa do ultrassom são muito direcionais e também atenuadas muito rapidamente.

Nas indústrias as redes de ar são montadas próximo ou nas linhas de produção onde os ruídos de fundo audíveis dificultam a localização do ruído ultrassônico.

Com o detector ultrassônico montado para inspeção, deve-se direcionar o seu sensor interno ou externo para os pontos a ser inspecionado mantendo uma distância segura e mais próxima do ponto inspecionado acompanhando toda a circunferência do tubo, quando identificado à anormalidade, o técnico deverá escutar um ruído (escoamento de fluídos) do atrito do gás com a parede da tubulação inspecionada, sabendo que a anormalidade é pontual o técnico deverá confirmar o ponto com o deslocamento de 60 Graus (no sentido vertical e horizontal) do técnico com o ruído ultrassônico mantendo o aparelho direcionado para o mesmo.

Para os vasos de pressão, as inspeções seguem os mesmos procedimentos e técnicas das inspeções em rede de ar, porém devemos ter mais atenção quanto à parte inferior em redes que tem alto índice de umidade, em conjunto o ar comprimido é raramente limpo, ele contém “escamas” da tubulação, óxido de ferro e outros agentes agressores que se alojam na parte inferior dos vasos durante o processo de trabalho causando a fadiga das paredes gerando furos e perdas indesejáveis.

Na Figura 24 pode-se observar o equipamento para medição por ultrassom.



Figura 24 – Equipamento de Ultrassom  
Fonte: Autoria Própria.

A grande maioria dos vazamentos e desperdícios de ar comprimido se encontra no consumo final e são vários fatores os responsáveis: engates rápidos, mangueiras furadas, válvulas vazando, vedações desgastadas, conexões mal realizadas, danos na tubulação, juntas danificadas, registros abertos, tubulações corroídas, limpeza de superfícies empoeiradas ou roupas, etc...

Todos estes fatores devem ser tratados e corrigidos de forma que se evitem estas grandes fontes de desperdício.

Vazamentos de ar comprimido são sinônimos de perda, resultando elevação do custo operacional. Vazamentos entre 10% e 15% são comuns na maioria dos sistemas. A verificação de vazamentos desta auditoria identifica, registra e quantifica esses vazamentos em todo o sistema de ar comprimido.

A Figura 25 mostra o sistema de distribuição da planta da Renault do Brasil, onde foi realizada toda a medição de vazamentos através do ultrassom.



Figura 25 – Sistema de Distribuição de Ar Comprimido da Renault do Brasil  
Fonte: Sistema Supervisório da Renault do Brasil.

### 3.3.1.2 Medida por tempo de carga

Usado quando o equipamento usa controle de modulação. Na Figura 26 encontra-se a fórmula para medição dos vazamentos pelo método do tempo de carga.

Onde:

Vv = Volume do Vazamento;

Vc = Volume do Compressor;

tc = tempo em carga.

$$V_v = V_c \cdot \frac{\sum_{i=1}^m t_{c_i}}{t_i}$$

Figura 26 – Fórmula para cálculo de vazamentos por tempo de carga.  
Fonte: COMPRESSED AIR AND GAS INSTITUTE “Manual de Ar Comprimido e Gases”; Pearson Education do Brasil; Brasil; 8820 p.; 2004.

#### 4 ESTUDO DE CASO: RENAULT DO BRASIL

A planta da Renault do Brasil conta hoje com 3 compressores ZR 750 cada um com sistema de partida direta em 4.160 V e 750 kW cada e um compressor ZR 900 VSD com sistema de partida por inversor de frequência e 900 kW de potência e está sendo instalado mais um compressor ZR 750 para ampliação da Fábrica. Este parque de máquinas atende as três fábricas que fazem parte do Complexo Ayrton Senna, a fábrica de veículos de passeio, a fábrica de veículos utilitários e a fábrica de motores. A Figura 27 representa a sala de compressores da planta da Renault do Brasil.



Figura 27 – Sala de Compressores da Renault do Brasil  
Fonte: Autorial Própria.

Devido ao grande potencial de economia de energia na área de ar comprimido, é feita a análise neste sistema na planta da Renault do Brasil e tomada a decisão de realizar um estudo através da auditoria citada no capítulo anterior, levando-se em conta as reais possibilidades de redução de custos e a

conscientização da utilização correta do ar comprimido. O ar comprimido é um recurso vital no processo produtivo, que também contribui de forma significativa para o consumo de energia elétrica.

Como na planta da Renault do Brasil existe uma única central de ar comprimido, definiu-se que o trabalho começaria pela análise da geração. Na Figura 28 pode-se observar um leiaute da central de compressores analisada.



Figura 28 – Leiaute da Central de Compressores da Renault do Brasil  
Fonte: Relatório de Auditoria na Instalação de Ar Comprimido, Renault CWB, outubro 2.008.

De acordo com os dados fornecidos pela empresa Atlas Copco, na maioria das instalações de compressores de ar, a energia elétrica corresponde a 73% do custo na vida de um sistema de ar comprimido, outra constatação é que até 30% dessa energia pode estar sendo desperdiçada, elevando o custo operacional, como pode ser observado na Figura 29.

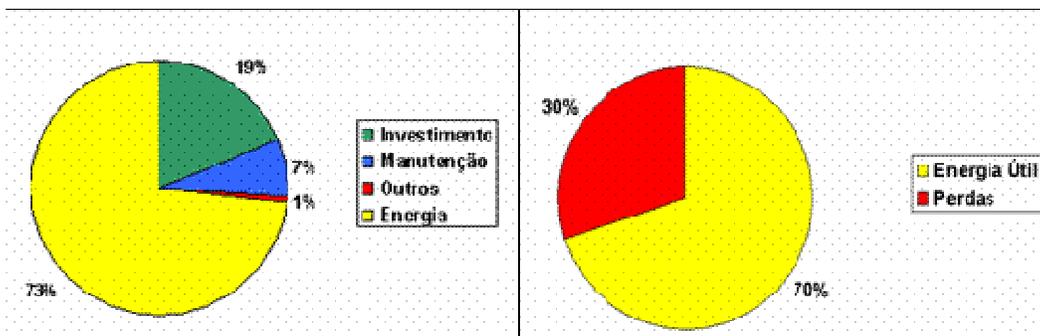


Figura 29 – Custo do Sistema de Ar Comprimido e Custo da energia Desperdiçada  
Fonte: Atlas Copco, 2006.

Na Figura 30 estão demonstradas todas as partes, ou subsistemas, do sistema de ar comprimido, estes são verificados e analisados, assim como as perdas em cada subsistema, que são: a geração, a distribuição e a utilização.

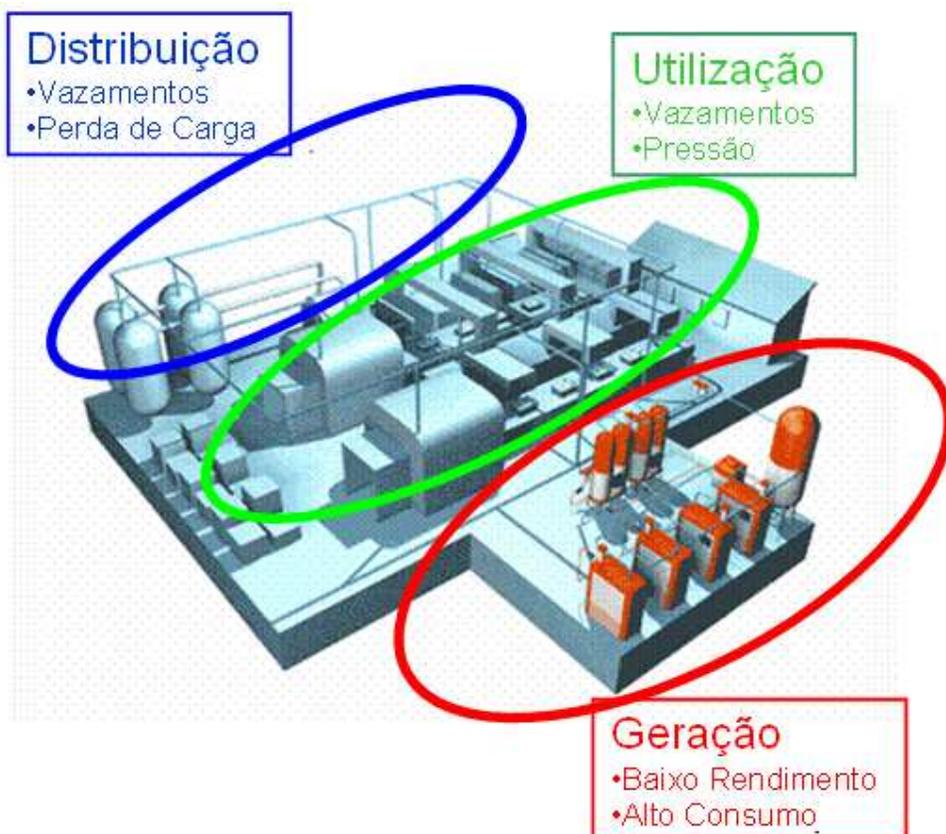


Figura 30 – Perdas em um Sistema de Ar Comprimido  
Fonte: Atlas Copco, 2006.

#### 4.1 RESULTADOS DA VERIFICAÇÃO DO SISTEMA DE AR COMPRIMIDO

Os compressores foram monitorados por 6 dias, período o qual as demandas de vazão e energia do sistema foram medidas.

A Tabela 09 demonstra as características dos equipamentos monitorados.

Compressores	ZR 750	ZR 750	ZR 750	ZR 900 VSD	Total do Sistema
Número de série	89710460	971044	S/I	75985*	
FAD. Real (l/s)	1734	1728	1734	1895	7091
Pot. em Alívio (kW)	98	98	98	68	362
Pot. em Carga (kW)	674	670	670	881	2895
Pres. em Alívio (bar)	8.1	8.1	8.1	ñ aplicável	---
Pres. em Carga (bar)	7.2	7.2	7.2	ñ aplicável	---
Pres. Setpoint (bar)	---	---	---	7.2	---
Parada indireta (bar)	---	---	---	---	---
Parada direta (bar)	---	---	---	---	---
T. em Alívio (min)	---	---	---	---	---
Parada programada (s)	20	20	20	ñ aplicável	---
# Partidas	3/h	3/h	3/h	ñ aplicável	---

Tabela 09 – Características dos Compressores Monitorados  
 Fonte: Relatório de Auditoria na Instalação de Ar Comprimido, Renault CWB, outubro 2.008.

A Tabela 10 demonstra os tempos e os consumos dos equipamentos medidos no período da auditoria e ao final a energia consumida por cada compressor. Na Tabela 10 também se pode observar que a energia consumida no período do estudo é de aproximadamente 193.778 kWh.

O sistema opera com dois compressores carga/alívio e um compressor com variação de velocidade, ficando um compressor carga/alívio parado durante o período.

Compressores	ZR 750 89710460	ZR 750 971044	ZR 750 S/I	ZR 900 VSD	Total do Sistema
Tempo em Carga (h)	66.50	105.40	0.00	167.30	339.20
Tempo em Alívio (h)	9.80	2.20	0.00	0.10	12.10
Tempo em Parada (h)	67.70	36.40	0.00	0.00	104.10
Ciclos Carga/Alívio	178.00	36.00	0.00	0.00	214.00
Energia em Carga (kWh)	44,821.00	70,618.00	0.00	77,043.00	192,482.00
Energia em Alívio (kWh)	1,078.00	215.60	0.00	3.00	1,296.60
Total Energ. Cons. (kWh)	45,899.00	70,833.60	0.00	77,046.00	193,778.60
Energia Consumida (R\$)*	6,884.85	10,625.04	0.00	11,556.90	29,066.79
<b>Consumo Energia Anual (R\$)**</b>	<b>R\$ 418,828.38</b>	<b>R\$ 646,356.60</b>	<b>R\$ 0.00</b>	<b>R\$ 703,044.75</b>	<b>R\$ 1,768,229.73</b>

\* Considerando o intervalo do estudo de 6 dias a um custo de energia elétrica (kWh) de R\$ 0,15

\*\* Considerando 365 dias por ano

Tabela 10 – Dados Medidos na Auditoria

Fonte: Relatório de Auditoria na Instalação de Ar Comprimado, Renault CWB, outubro 2.008.

Os dados da Tabela 10 são obtidos através da utilização de um medidor de corrente via TC (Transformador de Corrente) que mede a corrente dos compressores, e com estes valores, é possível se obter um perfil de consumo de vazão da planta analisada. Isto é possível porque, conhecendo-se os dados de vazão e corrente nominal dos compressores é possível obter uma relação entre as duas grandezas que permite através da corrente medida se chegar à vazão correspondente no dado momento.

Os dados coletados pelo medidor de corrente são transferidos a um software (ME Box), este software faz a correspondência entre a corrente e a vazão como citado no parágrafo anterior, com os valores de corrente em carga e alívio é possível de se fazer uma análise e o perfil de vazão é obtido, de acordo com a capacidade de cada máquina.

O aparelho que realiza esta medição é o “Il Track” e pode ser visualizado na Figura 31.



Figura 31 – Il Track - Equipamento de medição de corrente.  
Fonte: Relatório de Auditoria na Instalação de Ar Comprimido, Renault CWB,  
outubro 2.008.

Com a medição de rendimento das máquinas foi constatado que as quatro máquinas estão com suas vazões dentro dos limites aceitáveis, como pode ser verificado na Tabela 11 e no Gráfico 06. Segundo informações da Atlas Copco, o valor limite para aceitação de rendimento de um compressor é em torno de 95 %, mas deve ser feita uma análise antes de realizar o reparo ou substituição da máquina, pois isto depende do tamanho e capacidade do compressor.

Modelo Compressor	ZR 750	ZR 750	ZR 750	ZR 900 VSD
Fabricante	Atlas Copco	Atlas Copco	Atlas Copco	Atlas Copco
N. Série	89710460	971044	Sem ident.	75985*
Vazão Nominal (l/s)	1734	1739	1739	1939
<b>Vazão Real (l/s)</b>	<b>1730</b>	<b>1728</b>	<b>1734</b>	<b>1895</b>
<b>Rendimento (%)</b>	<b>99</b>	<b>99</b>	<b>99</b>	<b>98</b>
Horas Totais (h)	23221	30977	27194	43901

Tabela 11 – Valores de Vazão lidos nos Compressores  
 Fonte: Relatório de Auditoria na Instalação de Ar Comprimado, Renault CWB, outubro 2.008.

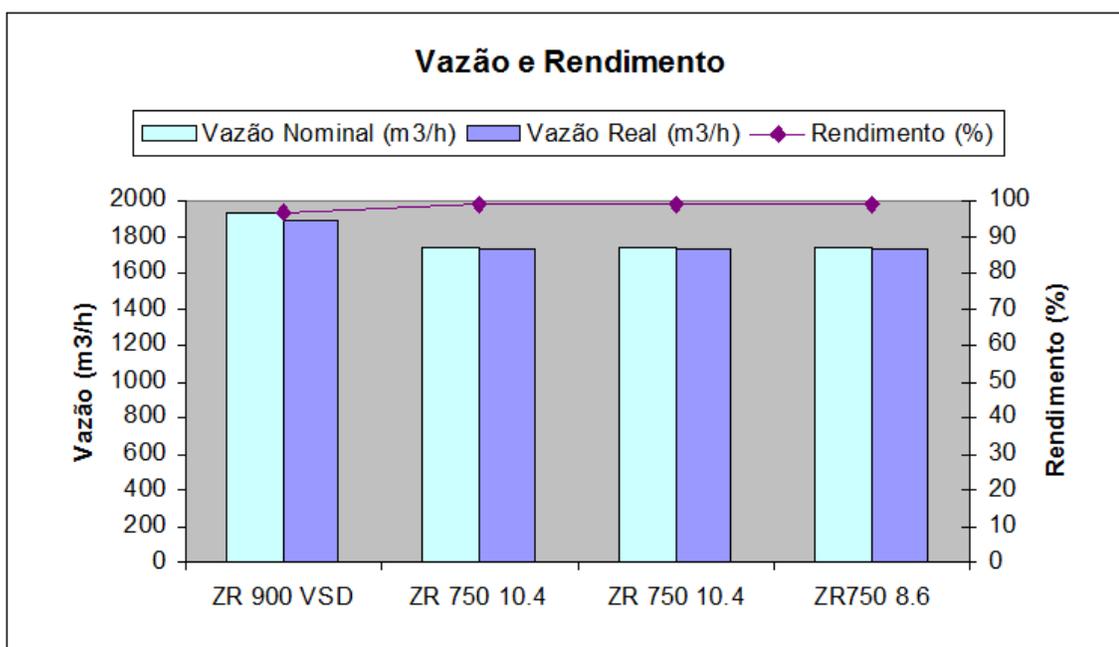


Gráfico 06 – Valores de Rendimentos dos Compressores  
 Fonte: Relatório de Auditoria na Instalação de Ar Comprimado, Renault CWB, outubro 2.008.

Com relação ao trabalho de medição dos vazamentos, foram encontrados 2.058 pontos no sistema de ar comprimido, o que representa aproximadamente 29,44 % (1.542,07l/s) da demanda de ar produzida, como pode ser observado no Gráfico 07. Estes vazamentos representam uma perda de energia anual de 3.469.567,50 kWh, com um custo aproximado de R\$ 520.448,62 (baseado na potência consumida pelo compressor ZR750). Para este cálculo foi considerado um valor um pouco mais conservador que ficou em R\$ 0,15 / kWh, prevendo que não

seriam sanados todos os vazamentos e o valor não ficaria muito fora da realidade. Segundo informações da Atlas Copco, em grandes indústrias normalmente são sanados cerca de 80% dos vazamentos encontrados, baseado nestas informações foi reduzido o valor médio do kWh em aproximadamente 20%.

As medições de vazamentos foram realizadas no período de 07/07/2008 a 21/09/2008.



Gráfico 07 – Percentual de Vazamento Encontrado X Ar Utilizado  
Fonte: Relatório de Auditoria na Instalação de Ar Comprimido, Renault CWB, outubro 2.008.

Na tabela 12 são indicados os números de pontos de vazamentos encontrados por áreas, onde consta a vazão, a potência consumida, o valor em Reais e a quantidade de cada ponto de vazamento encontrado.

Os valores indicados na Tabela 12 devem ser considerados apenas como indicadores de quanto se desperdiça com vazamentos de ar comprimido.

Area	Valor (l/s)	Valor em kW/h	Valor em R\$	Pontos
<b>Carroceria CVU</b>	165.62	372645,00	R\$ 55.896,75	205
<b>Carroceria</b>	464.30	1044675,00	R\$ 156.701,25	495
<b>Estamparia</b>	41.11	92497,50	R\$ 13.874,63	23
<b>Montagem CVU</b>	37.41	84172,50	R\$ 12.625,88	107
<b>Montagem CVP</b>	175.26	394335,00	R\$ 59.150,25	328
<b>Pintura CVU</b>	56.45	127012,50	R\$ 19.051,88	106
<b>Pintura CVP</b>	292.22	657495,00	R\$ 98.624,25	365
<b>UtilidadesCVU</b>	11.34	25515,00	R\$ 3.827,25	11
<b>Utilidades</b>	13.66	30735,00	R\$ 4.610,25	26
<b>Oficina Utilidades</b>	2.62	5895,00	R\$ 884,25	9
<b>Fornecedores Escapamentos</b>	3.99	8977,50	R\$ 1.346,63	8
<b>Fornecedores Estofamentos</b>	6.60	14850,00	R\$ 2.227,50	24
<b>Motores Bloco</b>	77.67	174757,50	R\$ 26.213,63	136
<b>Motores Cabeçote</b>	58.74	132165,00	R\$ 19.824,75	95
<b>Motores Montagem</b>	16.78	37755,00	R\$ 5.663,25	46
<b>Motores Virabrequim</b>	98.98	222705,00	R\$ 33.405,75	57
<b>Motores Central de Filtragem</b>	19.32	43470,00	R\$ 6.520,50	17
<b>TOTAL</b>	<b>1542.07</b>	<b>3469657.50</b>	<b>R\$ 520.448,63</b>	<b>2.058</b>

Tabela 12 – Vazamentos encontrados nas diversas áreas da Fábrica  
Fonte: Autoria própria.

Sabe-se que, para quantificar um vazamento devem-se utilizar muitas variáveis, tais como: diâmetro do furo, pressão existente no local do vazamento, velocidade e temperatura. No entanto utilizou-se apenas a referência de valores como base de cálculo.

#### 4.2 CONCLUSÕES DA AUDITORIA

Foi estudado o perfil de consumo da rede da Renault através do monitoramento da corrente dos compressores em operação.

O ZR 900 VSD, é o compressor que está com o maior tempo de ocupação; por ser uma máquina com variação de velocidade é importante que ela trabalhe em uma zona intermediária do gráfico de operação, pois desta forma preencherá todos os “gaps” de vazões existentes na rede.

Verificou-se que é possível aperfeiçoar o tempo de ocupação das máquinas bem como reduzir os gastos na geração de ar comprimido com a instalação de um gerenciador no sistema.

Verifica-se ainda a necessidade de uma ação imediata a fim de eliminar os vazamentos existentes na rede, pois esta ação representará menor perda de carga ao longo da instalação bem como menor desperdício de ar comprimido.

De acordo com as medições de eficiência dos compressores, todos apresentaram valores aceitáveis, que são acima de 95% de rendimento.

### 4.3 AÇÕES REALIZADAS NA RENAULT

#### 4.3.1 Manutenção dos Compressores e Secadores

Readequação e reprogramação do planejamento das manutenções preventivas dos compressores e secadores, onde foi realizado um contrato de manutenção com o fabricante levando-se em conta o período de funcionamento de cada máquina e a idade das mesmas.

Foi adquirido um medidor de energia e atualmente nas preventivas é feita a análise de corrente dos compressores para verificação se os mesmos estão operando de acordo com as recomendações do manual do fabricante.

#### 4.3.2 Vazamentos

O fato interessante é que 72 % do total de vazamentos encontravam-se em conexões de mangueiras e engates rápidos. Pode-se concluir com isto que a conscientização dos operadores é fundamental para redução no consumo de ar comprimido (Figuras 32 e 33).



Figura 32 – Vazamento em Manômetro



Figura 33 – Vazamento em Mangueira

Para continuar o trabalho de detecção dos vazamentos foi adquirido um medidor ultrassônico e designado um colaborador do Departamento de Manutenção Central para realizar medições em intervalos de tempos definidos nas áreas da fábrica.

Com estes dados este colaborador realiza um relatório com o levantamento de todos os pontos e repassa o mesmo para o responsável de cada área em questão. Em quatro meses de trabalho conseguiu-se sanar cerca de 60 % dos vazamentos, o que proporciona uma redução de aproximadamente 9,3% no consumo de energia elétrica dos compressores.

Na Figura 34 pode-se verificar um exemplo de relatório que cada responsável de área recebe com os pontos de vazamento encontrados sob sua responsabilidade. Estes relatórios possuem a foto do local onde se encontrou o vazamento, a descrição do local do vazamento, a vazão de ar do vazamento encontrado e o seu equivalente em Reais. O ponto também é identificado com uma fita com o número correspondente do vazamento.

RELATÓRIO	
<p>Número da Medição</p> <p>FOTO</p> <p>Localização</p>	<p>Foto: 71</p>  <p>Valor Coletado (dB) 55 Valor em Us 0,368</p> <p>Setor C64 BL</p> <p>Local do vazamento Engate rápido do conjunto lubrificante embaixo do painel do posto 09</p> <p>Valor da Medição Corrigido para Litros/Seg</p>
	<p>Foto: 72</p>  <p>Valor Coletado (dB) 48 Valor em Us 0,321</p> <p>Setor C64 BL</p> <p>Local do vazamento Conexão da mangueira no dispositivo 15 no 130145</p> <p>Valor da Medição</p>
	<p>Foto: 73</p>  <p>Valor Coletado (dB) 65 Valor em Us 0,997</p> <p>Setor C64 BL</p> <p>Local do vazamento Parafusadeira do bloco J na conexão com a mangueira que sai do painel do posto 14</p> <p>ÁREA</p>

Figura 34 – Relatório de Vazamentos de Ar  
Fonte: Relatório de Vazamentos da Renault do Brasil.

Além das medições com o aparelho de ultrassom e os relatórios, é realizada uma Campanha de “Caça Vazamentos”. Esta campanha tem o intuito de sensibilizar os colaboradores da empresa a economizar o ar comprimido e saber o quanto custa a produção deste fluido.

A campanha é dividida em 2 etapas, onde a primeira etapa é voltada à informação, através de meios informativos internos da empresa (8 páginas, jornal de banheiro, etc...), conversa com supervisores para identificação dos problemas e impactos gerados, demonstração de números de vazamentos identificados nos setores e com isto gerar um indicador de acompanhamento.

A segunda etapa é voltada aos treinamentos para os colaboradores. Estes treinamentos são rápidos (de no máximo 30 minutos) de modo a conscientizar as pessoas quanto a importância e o custo do ar comprimido. Os treinamentos basicamente mostram quanto custa produzir o ar comprimido, como identificar um vazamento, onde identificar um vazamento e o que fazer quando um vazamento for encontrado.

Um ponto bem trabalhado é relacionado ao uso indevido do ar. Utilizar ar comprimido para secagem ou limpeza de superfícies é uma prática comum na maioria das empresas brasileiras onde produz perdas significativas nos sistemas de geração. É comum encontrar colaboradores de manutenção varrendo o chão ou soprando ar comprimido para tirar o pó de equipamentos ou até das próprias roupas, prática nociva à saúde porque pode impregnar a pele com pequenas impurezas.

#### 4.3.3 Gerenciador da Rede de Ar Comprimido

Outro trabalho para a racionalização do uso de compressores, é a instalação de um novo sistema de gerenciamento dos compressores denominado ES 130, onde este sistema controla as 04 máquinas, sendo o compressor ZR 900 o mestre. Com este novo controlador, tem-se a possibilidade de reduzir a faixa de pressão mínima e máxima da rede de ar comprimido, assim como ajustar automaticamente uma faixa de pressão para horário produtivo e uma faixa de pressão em horário não produtivo (mais baixa), sem afetar a produção. A quinta máquina que está sendo instalada também será interligada a este gerenciador.

Ainda, com este gerenciador, o sistema de partida e parada dos compressores é otimizado, uma vez que sempre é escolhida a máquina ideal para o consumo solicitado pela planta, poupando as máquinas que não são necessárias para a geração, utilizando sempre o conceito de otimização de energia elétrica.

Este sistema otimiza o consumo de energia “escolhendo” a melhor combinação de compressores em função do consumo do ar em cada momento, e também gerencia as funções de partida e parada, carga e alívio, impede que dois ou mais compressores tenham partida simultâneas, evitando sobrecarga na rede elétrica, além de fazer rodízio entre os compressores.

Em centrais com mais de um compressor, torna-se importante a utilização de sistemas de controle e otimização dos compressores. Com base no perfil de consumo da fábrica, estes sistemas possibilitam a otimização da exploração da central de compressores, através da seleção ótima dos equipamentos disponíveis na central, colocando os compressores em operação na sua zona de máxima eficiência, e redução da banda de pressão de regulação dos equipamentos.

O ideal é que a capacidade total de cada compressor seja adaptada com precisão para balancear o consumo. Na prática, a demanda de ar da planta varia constantemente. Quanto mais esse perfil flutua, mais economia de energia pode ser feita pelas sofisticadas centrais de controle.

A Figura 35 ilustra a atuação de um sistema de gerenciamento da rede de ar, com a variação de consumo de ar comprimido, podemos notar que o sistema sempre escolhe a configuração de compressores que proporciona a maior economia de energia.

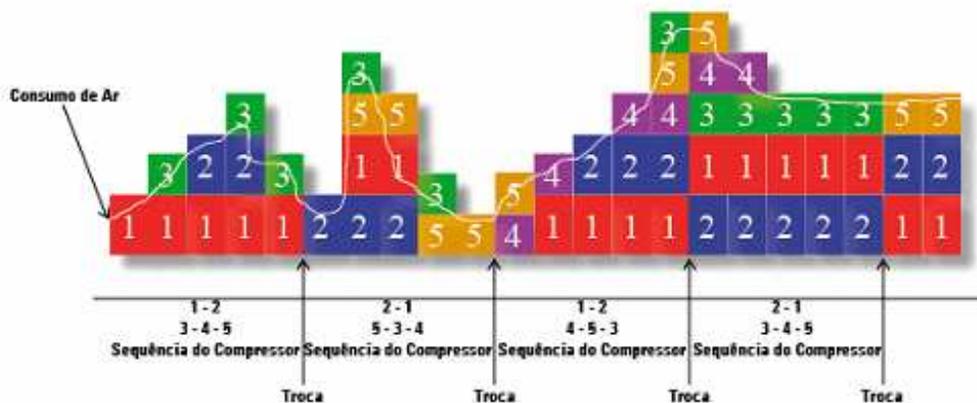


Figura 35 – Sistema de Gerenciamento da rede com 5 compressores  
Fonte: Atlas Copco, 2006.

Outro benefício importante que os sistemas de gerenciamento eletrônico proporcionam, é a redução na banda de pressão do sistema como um todo. Quanto menor a pressão média da rede de ar, menos "força" exercem os compressores, portanto tem-se uma grande redução do consumo de energia. A cada 1 bar de redução de pressão do sistema, temos 7% de economia de energia, além disso, com uma banda de pressão menor, os vazamentos são menores, diminuindo o desperdício (ATLAS COPCO,2006).

Exercendo menos "força", os compressores são poupados, aumentando sua vida útil e, portanto, reduzindo os custos de manutenção, que em conjunto com os gastos de energia e perdas por vazamento, constituem os ralos de consumo desnecessários, que podem ser evitados com a ajuda de um bom gerenciamento eletrônico.

A Figura 36 demonstra a redução da faixa de pressão da rede de ar com a utilização de um sistema gerenciador.

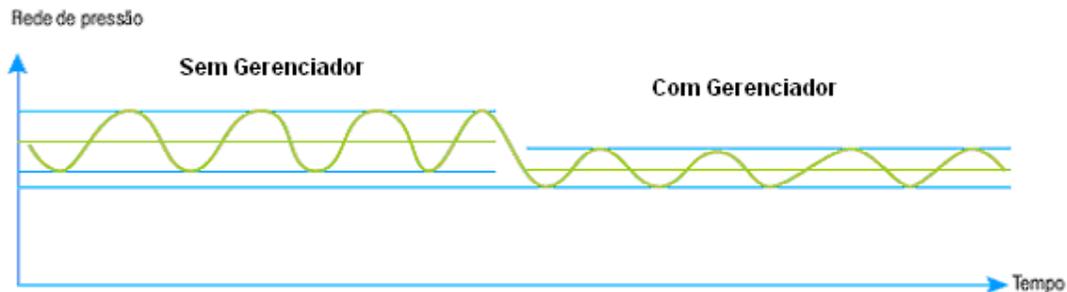


Figura 36 – Otimização da pressão da rede de ar comprimido  
Fonte: Atlas Copco, 2006.

As principais características de um sistema de gerenciamento são:

- Seleção automática do melhor mix de máquinas;
- Menor pressão média da rede;
- Compressores com variadores de velocidade sempre são utilizados para manter a pressão da rede;
- Compressores com variadores de velocidade são sempre mantidos na zona "ótima": a velocidade de cada compressor com variador de frequência é ajustada de maneira que a pressão da rede mantenha-se absolutamente estável e as máquinas sempre operem na faixa de maior rendimento;

- Controle de múltiplos compressores com variadores de velocidade, trazendo maior economia;
- Possibilidade de regulação de bandas de pressão, controladas manualmente ou pré-programadas;
- Utilização dos compressores de maneira otimizada;
- Equalização dos horímetros dos compressores;
- Criação de grupos para controle;
- Possibilidade de forçar a sequência dos compressores;
- Menor banda de pressão.

#### 4.3.4 Redução da Pressão da Rede de Ar Comprimido

É realizado também um estudo da necessidade de pressões nas diversas áreas da fábrica, com este trabalho, conseguiu-se otimizar a pressão na geração dos compressores em horários de produção e fora de produção. Antes deste trabalho, utilizava-se 7,6 bar de pressão na rede de ar em horários produtivos e não produtivos e atualmente, trabalha-se com a pressão de 7,1 bar e 6,6 bar respectivamente.

Como a faixa de pressão de toda a rede foi diminuída, houve também uma redução significativa nos vazamentos, pois, quanto menor a pressão, menor a perda de ar na rede. A cada 1 bar de redução de pressão além de diminuir o consumo de energia em 7% reduz também os vazamentos em 13%. (Fonte: Atlas Copco no site: <http://www.atlascopco.com/brbr/News/ProductNews/es16.aspx>).

Este trabalho exige muito esforço e colaboração do pessoal da área fabril, pois é necessário que se sejam testadas as pressões mais baixas nos sistemas produtivos e verificações de possíveis desvios, caso existam alguns equipamentos que necessitem pressões superiores, devem ser estudados sistemas de elevação de pressão (boosters), ou deve-se estudar a instalação de compressores menores, para atendimento de áreas específicas da Fábrica.

## 4.4 MEDIÇÃO E VERIFICAÇÃO

### 4.4.1 Caracterização da Unidade Consumidora

O plano de medição é realizado na planta da Renault do Brasil. Em meados de 1995 o Grupo Renault decidiu investir na construção de uma fábrica no Brasil, e em março de 1996 foi lançada a Pedra Fundamental, símbolo do início das obras. O local escolhido foi São José dos Pinhais, município da região metropolitana de Curitiba, no Paraná. Inicialmente foi construída a Fábrica de Veículos de Passeio, seguida da Fábrica de Motores (1999) e da Fábrica de Veículos Utilitários (2000) (Fonte: site: [www.renault.com.br](http://www.renault.com.br)).

Os investimentos foram da ordem de US\$ 1,35 bilhão. Essas três fábricas estão instaladas no chamado Complexo Ayrton Senna, que ocupa uma área total de 2,5 milhões de metros quadrados, dos quais 60% são áreas de preservação ambiental.

Empresa do setor automobilístico produz hoje aproximadamente 48 veículos por hora e passa por grandes investimentos para atingir a meta de 60 veículos por hora.

### 4.4.2 Descrição da Medida de Racionalização de Energia (MRE)

O plano de medição e verificação é efetuado no sistema de ar comprimido levando-se em consideração as seguintes ações realizadas no sistema: readequação do sistema de manutenção dos compressores, redução da pressão da produção do ar comprimido em horários produtivos e não produtivos, redução de aproximadamente 60% dos vazamentos da rede de ar comprimido, instalação de um novo sistema de controle que possibilita reduzir a faixa de pressão mínima e máxima da rede de ar comprimido.

### 4.4.3 Normas e Recomendações Aplicadas no Plano de M & V

Para execução do projeto são utilizadas as seguintes normas:

A norma NR 10 - Norma de regulamentação de segurança em energia elétrica;

A norma NBR 5410 – Instalações elétricas de baixa tensão;

A norma ISO 8573 - Qualidade do Ar Comprimido;

PIMVP – Protocolo Internacional de Medição e Verificação de Performance, Janeiro/2012.

#### 4.4.4 Definições Específicas do Plano de M & V

##### 4.4.4.1 Limite, fronteira de medição e efeitos interativos

O limite imaginário estabelecido é em volta do sistema de ar comprimido. Esta medição é feita então somente no consumo de energia elétrica dos compressores da planta em questão, levando-se em consideração os trabalhos de melhorias realizados no sistema de ar comprimido.

#### 4.4.5 Grandezas da M & V

##### 4.4.5.1 Variáveis independentes

Produção de veículos.

##### 4.4.5.2 Variáveis dependentes

Consumo de energia elétrica.

##### 4.4.5.3 Fatores estáticos

Temperatura.

#### 4.4.6 Opção da M & V

##### 4.4.6.1 Justificativa da opção da M & V

A opção utilizada para a medição é a opção C, porque as técnicas de verificação para a Opção C são destinadas as medições antes e pós-retrofit em toda a instalação considerada.

#### 4.4.7 Período e Intervalo da M & V

As medições são efetuadas em intervalos anuais para que se tenham todas as situações possíveis de consumo em um ano, com período igual o da concessionária local. As medições iniciaram em 2009, que é o período de referência (baseline) e a comparação é feita com relação ao ano de 2010, mas o controle continua até os dias atuais através da técnica do “Monitoring, Targeting and Reporting”.

#### 4.4.8 Medição da Medição e Verificação

##### 4.4.8.1 Período de referência

###### *4.4.8.1.1 Pontos de medição antes*

Leituras mensais dos medidores dos transformadores de cada compressor pelo período proposto. O somatório da medição de cada equipamento totaliza o consumo total de energia elétrica no sistema de ar comprimido.

##### 4.4.8.2 Período pós-retrofit

#### 4.4.8.2.1 Pontos de medição após

O mesmo sistema utilizado para os pontos antes da melhoria.

#### 4.4.9 Especificação dos Equipamentos da M & V

Os medidores de grandezas elétricas para cada transformador de cada um dos compressores são da marca GE, modelo PQMII T20.

#### 4.4.10 Precisão e Incerteza Esperada

O erro da medição do equipamento de medição, que segundo manual do fabricante, "Manual PQM II Power Quality Meter" é de 1%, sendo que o erro devido a modelagem (regressão) é estimado em 10% segundo orientações do PIMVP. Assim, o erro total da medição e verificação é de 10,05%.

#### 4.4.11 Preços de Energia

Os valores de custo de energia elétrica são considerados os vigentes no período das medições e estão demonstrados em cada cálculo realizados.

#### 4.4.12 Ajustes da M & V

##### 4.4.12.1 Ajuste de rotina

São realizados ajustes e correções com relação às horas de operação das máquinas, volumes de produção e valor do kWh, os dados dos fabricantes não serão alterados.

#### 4.4.12.2 Ajuste de não-rotina

Não são realizados ajustes de temperatura e outras condições atmosféricas.

#### 4.4.13 Responsável pela Execução da M & V

O Departamento da Manutenção Central / Utilidades é o responsável pelas medições e pelas informações das variáveis dependentes.

#### 4.4.14 Metodologia da Medição & Verificação

São medidos os consumos de energia em cada um dos compressores e feita à somatória destes totalizando o consumo mensal somente no sistema de ar comprimido, estas medições são realizadas no período antes e pós-melhoria. Será monitorada também a produção mensal de veículos.

São realizadas medições diretas e não serão realizados ajustes de medições, uma vez que todos os casos serão medidos antes e depois da melhoria.

#### 4.4.15 Execução da M & V

##### 4.4.15.1 M & V no período de referência

São realizadas as medições do consumo de energia do sistema de ar comprimido antes da melhoria e são registradas todas as variáveis dependentes e independentes. O período de referência é o ano de 2.009.

##### 4.4.15.2 M & V no período pós-melhoria

Após os trabalhos de melhorias no sistema são repetidas todas as medições do consumo de energia do sistema de ar comprimido e também serão registradas

todas as variáveis dependentes e independentes para comparação, o ano de referência após a melhoria é 2010.

#### 4.4.15.3 Comparativo da M & V e metas da MRE

Com o término das medições, os dados antes e depois das melhorias são analisados e comparados com o estudo com a devida regressão.

#### 4.4.16 Cronograma de M & V

Para este trabalho foram realizadas medições do ano de 2009, de antes da melhoria, e foram coletadas as medições em 2010 para efeito comparativo após a melhoria.

Todas as ações verificadas anteriormente iniciaram no final do ano de 2008 e foram implementadas em 2009 finalizando o ano de 2010. Por este motivo as análises dos resultados e as medições e verificações estão mostradas no intervalo de 2009 a 2010, como pode ser observado na Tabela 13.

	Dados de medição			M & V		Valor Economia (@ Preço Médio 175,20 R\$/MWh)	Soma Cumulativa da Economia	
	Período	Produção milhares	Consumo MWh	Consumo Específico MWh/kmil	Prognóstico MWh (@ 2009)			Diferença MWh (Antes - Após)
Período Referência	jan/09	11.666	629	53,91				
	fev/09	14.899	582	39,06				
	mar/09	19.346	727	37,57				
	abr/09	26.130	815	31,20				
	mai/09	28.635	856	29,91				
	jun/09	29.597	785	26,52				
	jul/09	33.743	860	25,48				
	ago/09	33.948	883	26,00				
	set/09	23.103	712	30,83				
	out/09	42.433	1.059	24,95				
	nov/09	40.629	989	24,34				
	dez/09	29.821	794	26,64				
Período Pós-retrofit	jan/10	38.042	924	24,28	950	26	R\$ 4.575,14	R\$ 4.575,14
	fev/10	22.698	756	33,31	736	-20	-R\$ 3.452,81	R\$ 1.122,33
	mar/10	37.169	936	25,18	938	1	R\$ 262,64	R\$ 1.384,97
	abr/10	36.254	950	26,20	925	-25	-R\$ 4.357,12	-R\$ 2.972,15
	mai/10	33.177	899	27,10	882	-17	-R\$ 3.006,38	-R\$ 5.978,52
	jun/10	44.854	997	22,22	1.044	48	R\$ 8.337,87	R\$ 2.359,35
	jul/10	46.162	1.051	22,76	1.063	12	R\$ 2.074,68	R\$ 4.434,03
	ago/10	47.727	1.039	21,76	1.084	46	R\$ 7.990,05	R\$ 12.424,08
	set/10	44.200	997	22,56	1.035	38	R\$ 6.676,87	R\$ 19.100,95
	out/10	44.690	938	20,99	1.042	104	R\$ 18.226,23	R\$ 37.327,18
	nov/10	46.265	1.027	22,20	1.064	37	R\$ 6.507,54	R\$ 43.834,72
	dez/10	40.905	920	22,49	989	70	R\$ 12.185,07	R\$ 56.019,80
	Total Após	11.433	Total Antes	11.753	320	R\$ 56.019,80		
				Percentual	2,72%			

Tabela 13 – Comparativo de Consumo X Produção dos anos 2.009 a 2.010  
Fonte: autoria própria.

Para se chegar ao valor do consumo evitado e conseqüentemente o valor economizado em Reais, devemos analisar os dados de consumo e produção referentes aos anos 2009 e 2010 da Tabela 13. Com estes dados pode-se traçar o gráfico para relacionar a produção com o consumo e gerar a equação de regressão  $0,0139 \times \text{Produção} + 420,92$ , como se pode observar no Gráfico 08.

Com esta equação colocam-se os valores medidos de produção de 2010 e verifica-se a real economia com as ações de melhoria.

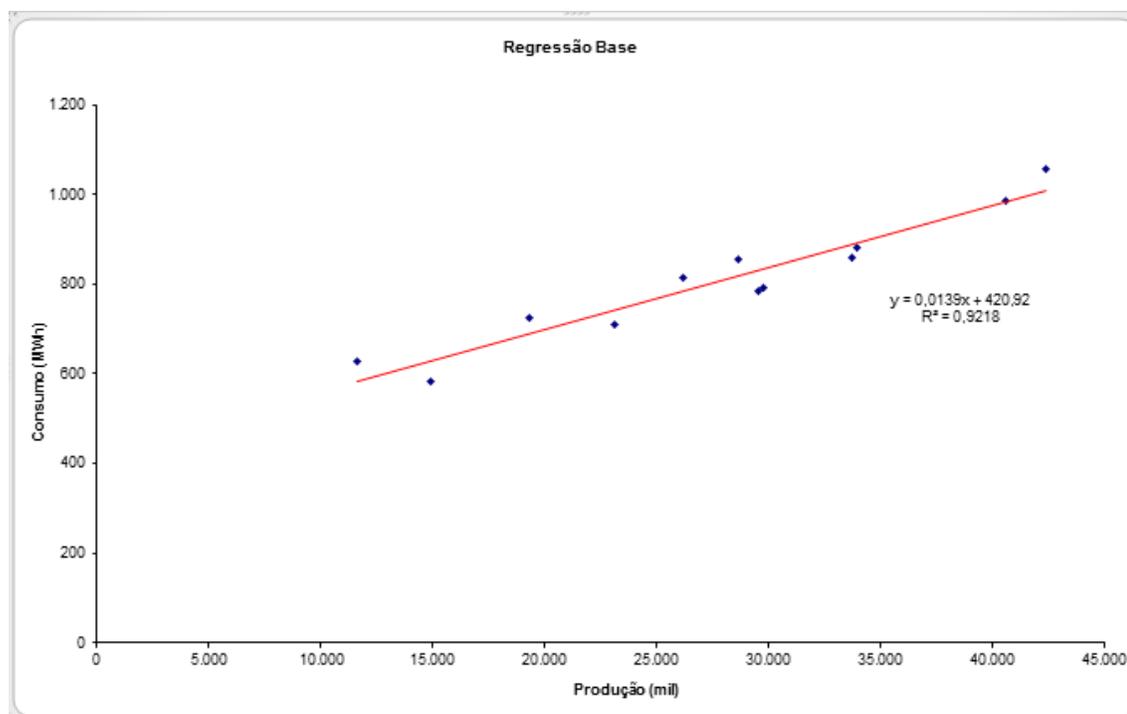


Gráfico 08 – Fórmula de regressão baseada na relação entre produção e consumo  
Fonte: autoria própria.

Com todas as ações realizadas na rede de ar comprimido, o comparativo do ano de 2.010 com relação ao ano de 2.009, pode-se observar uma economia no período de R\$ 56.019,80.

Pelo Gráfico 09 pode-se observar a soma cumulativa das ações no ano de 2.010 com relação ao ano de 2.009.



**Gráfico 09 – Soma cumulativa da economia das ações**  
Fonte: autoria própria.

Os investimentos executados para as melhorias são da ordem de R\$ 190.000,00, o qual incluem o serviço de auditoria, a aquisição do medidor de grandezas elétricas, a aquisição do aparelho de ultrassom e a aquisição do gerenciador dos compressores.

#### 4.5 MONITORING, TARGETING AND REPORTING - MTR

Atendendo ao axioma da “Monitoring, Targeting and Reporting” que diz: “não se pode gerenciar o que não pode medir”, buscamos programar essa metodologia de análise para o monitoramento contínuo das ações implementadas.

Entende-se que a medição e verificação nos mostra um análise em tempo definido, ou seja, estática, e que a técnica de MTR é a análise dinâmica e contínua das ações no tempo.

Este monitoramento irá permitir ao departamento de manutenção controlar o andamento das ações, onde poderá detectar desvios (por exemplo, aumento de vazamentos inesperados) ou comprovar mudanças esperadas de futuras ações.

Na Tabela 14 estão demonstrados os valores e dados para a composição do MTR.

Dados de medição				Baseline		
Período	Produção milhares	Consumo MWh	Consumo Específico MWh/mil	Prognóstico MWh	Diferença MWh	Soma Acumulada
jan/09	11.666	629	0,05	583	46	46
fev/09	14.899	582	0,04	628	-46	0
mar/09	19.346	727	0,04	690	37	37
abr/09	26.130	815	0,03	784	31	68
mai/09	28.635	856	0,03	819	38	105
jun/09	29.597	785	0,03	832	-47	58
jul/09	33.743	860	0,03	890	-30	28
ago/09	33.948	883	0,03	893	-10	18
set/09	23.103	712	0,03	742	-30	-12
out/09	42.433	1.059	0,02	1.011	48	36
nov/09	40.629	989	0,02	986	3	39
dez/09	29.821	794	0,03	835	-41	-2
jan/10	38.042	924	0,02	950	-26	-28
fev/10	22.698	756	0,03	736	20	-9
mar/10	37.169	936	0,03	938	-1	-10
abr/10	36.254	950	0,03	925	25	15
mai/10	33.177	899	0,03	882	17	32
jun/10	44.854	997	0,02	1.044	-48	-16
jul/10	46.162	1.051	0,02	1.063	-12	-28
ago/10	47.727	1.039	0,02	1.084	-46	-73
set/10	44.200	997	0,02	1.035	-38	-111
out/10	44.690	938	0,02	1.042	-104	-215
nov/10	46.265	1.027	0,02	1.064	-37	-253
dez/10	40.905	920	0,02	989	-70	-322
jan/11	48.282	1.076	0,02	1.092	-16	-338
fev/11	37.350	994	0,03	940	53	-284
mar/11	45.214	1.148	0,03	1.049	99	-186
abr/11	42.356	990	0,02	1.010	-19	-205
mai/11	49.351	1.143	0,02	1.107	36	-169
jun/11	48.792	1.089	0,02	1.099	-11	-179
jul/11	52.932	1.114	0,02	1.157	-42	-222
ago/11	57.634	1.177	0,02	1.222	-45	-267
set/11	56.441	1.135	0,02	1.205	-71	-338
out/11	59.084	1.165	0,02	1.242	-77	-414
nov/11	57.571	1.108	0,02	1.221	-114	-528
dez/11	32.983	957	0,03	879	77	-450
jan/12	52.008	929	0,02	1.144	-215	-665
fev/12	53.442	1.063	0,02	1.164	-100	-766
mar/12	60.981	1.305	0,02	1.269	37	-729
abr/12	50.967	1.124	0,02	1.129	-6	-735
mai/12	59.354	1.234	0,02	1.246	-12	-747
jun/12	47.456	1.146	0,02	1.081	65	-682
jul/12	63.132	1.228	0,02	1.298	-71	-753
ago/12	65.596	1.255	0,02	1.333	-78	-831
set/12	54.736	1.156	0,02	1.182	-26	-857
out/12	61.931	1.305	0,02	1.282	23	-834
nov/12	58.239	1.255	0,02	1.230	25	-809
dez/12	15.505	662	0,04	636	25	-784

Tabela 14 – Dados para composição da MTR  
Fonte: autoria própria.

Na Tabela 14 os valores marcados em laranja representam o período de baseline (referência) e o período marcado em azul é o período com melhor

desempenho das ações e que serve de meta, sendo que a regressão do baseline é a mesma indicada no Gráfico 08.

Com a equação do Gráfico 10 pode-se criar o gráfico denominado Carta de Controle o qual pode ser utilizado para analisar eventuais desvios encontrados nas medições. A Carta de controle pode ser observada no Gráfico 11, e a mesma representa as medições entre os anos de 2.009 a 2.012.

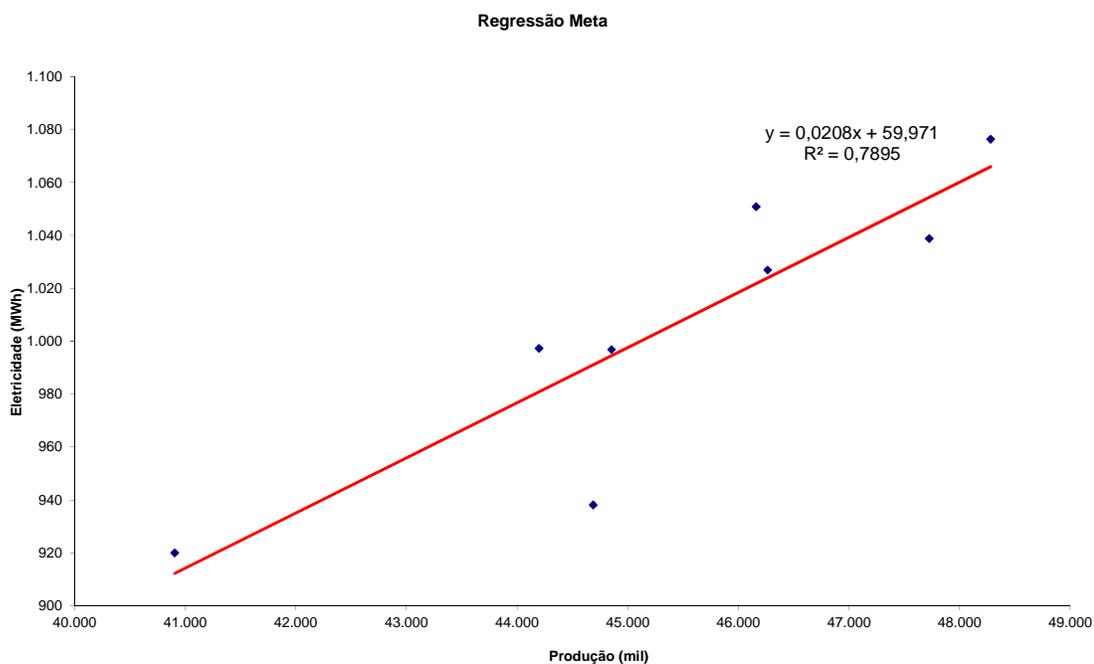


Gráfico 10 – Fórmula de regressão da meta baseada na relação entre produção e consumo

Fonte: autoria própria.

O Gráfico 11 ilustra no tempo o andamento das ações que em alguns momentos se desviou, porém, com a intervenção do departamento de manutenção isso vem se mantendo dentro do controle.

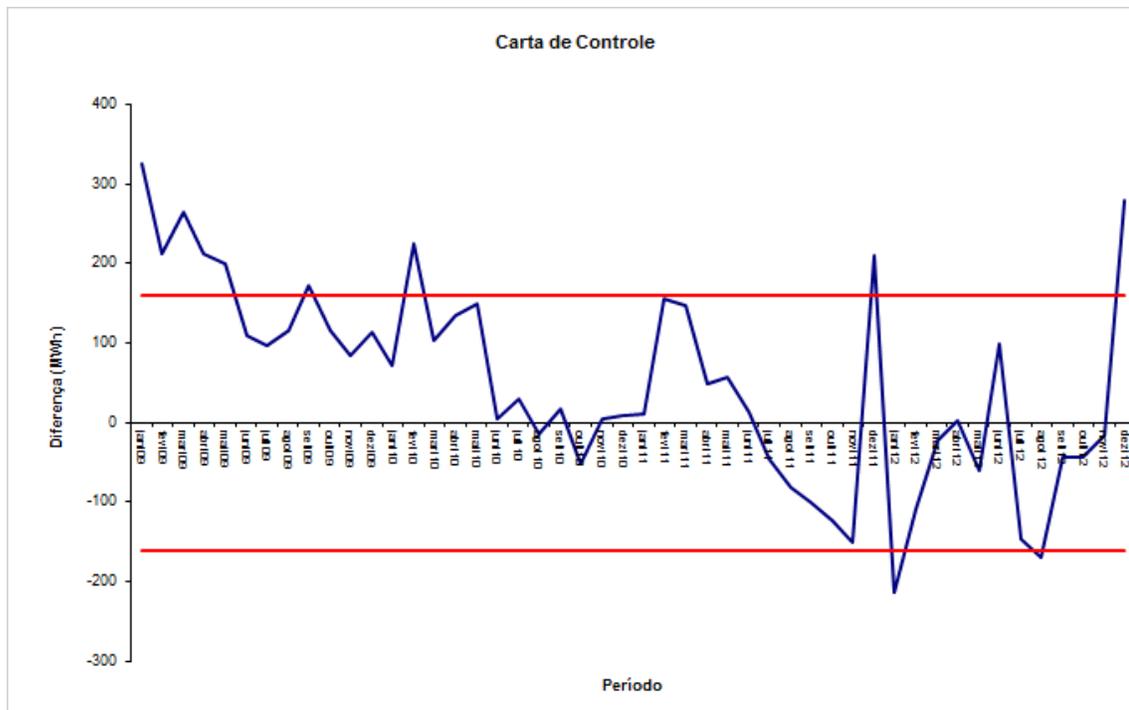


Gráfico 11 – Carta de Controle para as ações implementadas  
Fonte: Autoria própria.

## 5 CONCLUSÃO

No final do trabalho pode-se concluir que os objetivos listados no início do projeto são atingidos como se pode verificar em seguida:

- O sistema de manutenção dos compressores é revisto e revisado, baseado na idade das máquinas e estado de conservação das mesmas. Também foi inserido nas manutenções preventivas da medição da qualidade de energia dos compressores, onde foi adquirido um medidor de energia elétrica e são feitas medições constantes para verificação das correntes e possíveis anormalidades no funcionamento dos compressores;

- A medição de rendimento dos compressores da planta é realizada, o que comprovou que os compressores estão com a vazão dentro dos limites aceitáveis;

- A pressão da produção do ar comprimido em horários produtivos e não produtivos é reduzida devido estudos realizados nos consumidores que necessitavam de maiores pressões de ar, com isto, foram adequados os sistemas de manutenção dos equipamentos de uso final de ar comprimido e também foram adequados estes consumos específicos;

- Foram detectados os vazamentos de ar na rede de ar comprimido, onde a rede de ar foi minuciosamente verificada para constatar potenciais fontes de desperdício, o que permitiu eliminar parte dos vazamentos encontrados.

Com estes trabalhos e ações, o resultado final com relação ao trabalho de detecção de vazamentos, foi verificado que existia uma perda de aproximadamente 29,44 % na produção de ar comprimido, e em quatro meses de trabalho foi conseguido sanar cerca de 60 % dos vazamentos, o que proporcionou uma redução de aproximadamente 9,3% no consumo de energia elétrica dos compressores.

Outra constatação foi que com a racionalização do uso de compressores e com a instalação de um novo sistema de controle, foi possível reduzir a faixa de pressão mínima e máxima da rede de ar comprimido, e com o estudo da necessidade de pressões nas diversas áreas da Fábrica, foi otimizada a pressão na geração dos compressores em horários de produção e fora de produção, antes deste trabalho, era utilizado 7,6 bar de pressão na rede de ar em horários produtivos e não produtivos e hoje a pressão é de 7,1 bar e 6,6 bar respectivamente.

Através as análises de medição e verificação pode-se verificar que através de todos os trabalhos foi obtida uma economia de aproximadamente R\$ 56.019,80, no período de 2.009 até 2.010, e esta economia continua a cada ano.

Outra grande ferramenta, demonstrada neste trabalho, que pode ser utilizada pelo Departamento de Manutenção é o “Monitoring, Targeting and Reporting”, onde através deste se pode obter um sistema eficiente da gestão da manutenção e conservação.

No “Monitoring” se podem coletar regularmente os dados sobre consumos de energia, analisar os dados: controle da energia adquirida e consumida, matérias primas, produção e energia, evolução no tempo, relacionar o consumo de energia aos seus “fatores”, investigar os desvios em relação ao desempenho esperado, tomam-se ações para corrigir os desvios e finalmente realizam-se as detecções das mudanças esperadas e inesperadas no consumo de energia.

No “Targeting” realiza-se a identificação e estipulação do nível de consumo de energia desejado (metas).

No “Reporting” procede-se com a formatação da informação, relato dos desvios e com isso colocam-se as informações certas nas mãos certas.

A correta utilização final do ar comprimido, que consiste na manutenção correta dos equipamentos de linha e principalmente na educação das pessoas que trabalham nestes postos, é de fundamental importância para termos um sistema funcional e econômico, pois, nestes postos é onde encontramos a maior parte dos vazamentos da rede de ar comprimido e, portanto a maior fonte dos desperdícios.

Com estes cuidados especiais no sistema de ar comprimido, além de grande economia financeira para a empresa, também contribuimos com o meio ambiente na questão de consciência no consumo de energias provenientes da natureza.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Atlas Copco, Distribuição de Ar, número: 15, ano: 2.002, mês: Setembro, páginas: 01 a 35.

ATLAS COPCO, **Relatório de Auditoria na Instalação de Ar Comprimido**, Renault CWB, outubro 2.008.

DOE – US Department of Energy. Improving Compressed Air System Performance. Estados Unidos: A sourcebook for industry, 2003.

Rollins, John P. **Manual de Ar Comprimido e Gases / Compressed Air and Gas Institute**; - Editora: Pearson – tradução e revisão técnica Bruno Buck – São Paulo: Prentice Hall, 2004.

**BlogAr** – O blog do ar comprimido. Disponível em: <http://mktproject.com.br/blogar/>.

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

MANUAL PRÁTICO - EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM SISTEMAS DE AR COMPRIMIDO – Eletrobrás / Procel.

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

ENERGY DEPARTMENT; “**Improve Compressed Air System Performance**”; Washington,D.C; U.S; 128 p.; 2003.

GRESH, THEODORE; “Compressor Performance”; 2nd ed.; London; 163 p.; 2007.

HANLON, PAUL C.; “Compressor Handbook”; 1nd ed.; Washington; D.C.; 1754 p.; 2001.

JÚNIOR, JOSÉ; “Apostila de Sistemas Hidropneumáticos 1”; Universidade Federal de Itajubá; Brasil; 80 p.; 2007.

Ronald Vgiles, **Mecânica de los Fluidos e Hidráulica** - M.C. Graw-hill Inc.

William F. Hughes, **Dinâmica de los Fluidos** - M.C. Graw-hill inc.

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

ATLAS COPCO BRASIL. Disponível em: <<http://www.atlascopco.com/brbr/News/ProductNews/es16.aspx>>. Acesso em: 28 jan. 2013.

WIKIPEDIA. Disponível em: <<http://pt.wikipedia.org/wiki/Ar>>. Acesso em: 30 jan. 2013.

Manual de Operação: "Manual PQM II Power Quality Meter".

Artigo na revista "Case Studies - Ano XV - Número 85 - Março/Abril 2011".

PIMVP – Protocolo Internacional de Medição e Verificação de Performance, Janeiro/2012.