

CARLOS EDUARDO MICHELS

ANÁLISE DO PROCESSO DE VÁCUO EM UNIDADES CONDENSADORAS  
DE CONDICIONADORES DE AR.

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Otto Beyer

Porto Alegre 2008



**Universidade Federal do Rio Grande do Sul**  
**Escola de Engenharia**  
**Departamento de Engenharia Mecânica**

**ANÁLISE DO PROCESSO DE VÁCUO EM UNIDADES CONDENSADORAS DE  
CONDICIONADORES DE AR**

**CARLOS EDUARDO MICHELS**

**ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS  
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE  
ENGENHEIRO(A) MECÂNICO(A)  
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**Prof. Dr. Walter Jesus Paucar Casas  
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica**

***BANCA EXAMINADORA:***

**PROF. DR. PEDRO BARBOSA MELLO  
UFRGS / DEMEC**

**PROF. DR. PAULO SMITH SCHNEIDER  
UFRGS / DEMEC**

**PROF. DR. VOLNEI BORGES  
UFRGS / DEMEC**

**Porto Alegre 2008**

Em especial à minha família, que tanto me apoiou durante minha formação acadêmica e a todos que contribuíram direta ou indiretamente para a finalização deste projeto.

## AGRADECIMENTOS

À Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, que ano após ano, entrega a sociedade engenheiros valorosos e capazes.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Paulo Otto Beyer que dedicou seu tempo e contribuiu grandemente para o desenvolvimento deste trabalho.

À minha mãe, Janice Scheer Michels, que apesar das dificuldades enfrentadas em certos momentos, soube suportar tudo, incentivou meus estudos e desafios e sempre demonstrou muito orgulho pelas minhas conquistas.

À minha querida, Natividade de Sá Couto Pereira, de quem o apoio é sempre essencial.

À Springer Carrier Ltda., em particular nas pessoas dos engenheiros, Marcelo Laurindo de Oliveira e Diego Bolsi Martins pelos dados utilizados no estudo e principalmente pela colaboração na solução de dúvidas pertinentes, bem como por acreditarem no potencial deste projeto.

Este trabalho contou com apoio da seguinte entidade:  
- Empresa Springer Carrier Ltda.

“As convicções são inimigas mais perigosas da verdade do que as mentiras.”  
(Friedrich Nietzsche)

MICHELS, C. E. ANÁLISE DO PROCESSO DE VÁCUO EM UNIDADES CONDENSADORAS DE CONDICIONADORES DE AR. 2008. 20f. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

## **RESUMO**

Através de análises experimentais e teóricas, buscou-se inicialmente compreender as variáveis de maior impacto, e a interação entre estas, durante o processo de vácuo ou desidratação de equipamentos condicionadores de ar de expansão direta. Este processo tem por objetivo remover gases não condensáveis e umidade dos circuitos do equipamento, onde irá fluir o gás refrigerante, evitando assim o mau funcionamento do aparelho e/ou falhas prematuras em seus componentes mais sensíveis, como compressores e dispositivos de expansão. Compreendidas as características chave do processo, buscou-se definir os melhores parâmetros de operação e programar melhorias que visam aumento de produtividade e qualidade do vácuo e sua medição, que em última análise resultariam em redução no nível de falhas de componentes destes equipamentos.

**PALAVRAS-CHAVE: Vácuo, Desidratação, Medição de pressão, Ar condicionado, Refrigeração.**

MICHELS, C. E. VACUUM PROCESS ANALISYS IN CONDENSING UNITS OF AIR CONDITIONER EQUIPMENTS. 2008. 20 pages. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

#### **ABSTRACT**

Using experimental and theoretical analysis, this project tries to understand the most relevant factors and their interaction during the vacuum (or dehydration) process in air conditioning equipments with direct expansion. The objective of this process is removing non-condensable gases and moisture from the equipment circuits, where the refrigerant gas will flow, avoiding bad functioning and premature failure in sensitive components, such as compressors and expansion devices. After understanding the key process inputs and outputs, the best specifications for the parameters were defined and improvements that aim to upgrade productivity and quality of vacuum and its measurement were suggested, which in a last analysis, would result in a decrease in the failure rates of those equipments

**KEYWORDS:** Vacuum, Dehydration, Pressure measurement, Air conditioner, Refrigeration.

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1 HISTÓRIA DO PROBLEMA INVESTIGADO.....</b>	<b>1</b>
<b>1.2 APLICAÇÃO NA INDÚSTRIA DE CONDICIONADORES DE AR.....</b>	<b>1</b>
<b>1.3 MOTIVAÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>1.4 DELIMITAÇÃO DA ABRANGÊNCIA E OBJETIVOS.....</b>	<b>2</b>
<b>2. DESENVOLVIMENTO .....</b>	<b>3</b>
<b>2.1. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>3</b>
<b>2.2. APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA .....</b>	<b>8</b>
<b>2.3. ANÁLISES REALIZADAS E PROBLEMAS EXPERIMENTAIS.....</b>	<b>12</b>
<b>3. CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS .....</b>	<b>17</b>
<b>BIBLIOGRAFIA CONSULTADA .....</b>	<b>18</b>
<b>ANEXO .....</b>	<b>19</b>
<b>APÊNDICE .....</b>	<b>20</b>

## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1 História do problema investigado

Engenheiros começaram a interessar-se por medição de vácuo por volta de 1600, quando se notou a incapacidade das bombas da época em elevar água a mais de 90 metros. Naquele tempo, o duque da Toscana na Itália contratou Galileu Galilei para investigar o problema. Este cientista desenvolveu uma série de experimentos com a finalidade de analisar as propriedades do ar. Entre as ferramentas utilizadas para estes experimentos estavam pistões para medir força e um manômetro de água (de cerca de 100 metros de altura) para medir pressões de vácuo.

Após a morte de Galileu em 1642, Evangelista Torricelli levou adiante o trabalho de investigação sobre vácuo e inventou o barômetro de mercúrio. Ele descobriu que a atmosfera exerce uma força de 14,7 libras por polegada quadrada (Psi) e que, dentro de um tubo evacuado essa pressão é suficiente para elevar uma coluna de mercúrio até 29,9 polegadas de altura (760 milímetros), unidade de medida que ainda nos dias de hoje é largamente utilizada.

Em 1644, o matemático francês Blaise Pascal auxiliado por um grupo de montanhistas transporta um barômetro pelos Alpes e prova que a pressão decresce com a altitude. A pressão barométrica média de 760 mm de mercúrio ao nível do mar é definida como a pressão atmosférica padrão e o valor de 1/760 da coluna de mercúrio é, em homenagem a Torricelli, definido como 1 torr.

Em 1872, McLeod inventa o Instrumento de detecção de vácuo de McLeod, que mede a pressão de um gás através de dupla medição do volume, inicialmente a uma pressão inferior desconhecida e posteriormente a uma pressão maior, de valor conhecido. O novo volume pressurizado é então uma indicação da pressão absoluta inicial. Versões do dispositivo de McLeod continuam a ser usadas hoje como padrões de calibração para dispositivos chamados vacuômetros. (tradução livre pelo autor, texto original de *Kurt J. Lesker Company – Basic Vacuum Concepts* - 2008)

### 1.2 Aplicação na indústria de condicionadores de ar

O processo de vácuo em equipamentos de ar condicionado, por vezes conhecido como desidratação, objetiva a remoção de gases não condensáveis e umidade da parte interna dos circuitos do aparelho (ASHRAE et al, 2006). Isto se faz necessário pois estes contaminantes, ao entrarem em contato com componentes fluidos do sistema, nomeadamente o gás refrigerante e o óleo lubrificante do compressor, usualmente geram óxidos e ácidos, cuja natureza é extremamente prejudicial ao bom funcionamento dos condicionadores de ar.

### 1.3 Motivação

Uma vez que o processo de vácuo é tido como extremamente crítico para a qualidade final do produto (HARRIS et al - 2005) e, segundo ASHRAE (2006) apenas equipamentos de ar condicionado com bom nível de vácuo cumprem especificações de projeto como eficiência termo-energética e vida útil, torna-se necessária uma boa compreensão dos fatores e características que impactam no processo e suas interações com o funcionamento do aparelho.

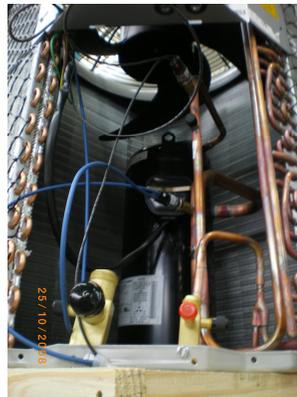
Para tal estudo, levando-se em consideração uma grande porção de falhas de campo, qualitativamente associada a uma baixa qualidade do vácuo em uma determinada linha de produtos, decidiu-se investigar as reais condições do sistema e do procedimento de vácuo durante a montagem dos referidos equipamentos a fim de se validar a hipótese apresentada

sobre a causa das falhas e propor um dimensionamento adequado àquela linha de montagem, bem como melhorias no sistema de execução da desidratação das unidades produzidas.

Abaixo seguem fotografias do equipamento alvo deste estudo, produzido nesta linha e de peças de compressores do tipo *scroll*, analisados após falha em campo.



**Figura 1.1 – Unidade condensadora modelo 38CCC de 16690W (57 kBtu/h)**



**Figura 1.2 – Visão interna da unidade condensadora, detalhes de válvulas**



**Figura 1.3 – Compressor tipo *Scroll* avariado por motivo de umidade**



**Figura 1.4 – Degradação de óleo do compressor em função de oxidação**

#### **1.4 Delimitação da abrangência e objetivos**

Entende-se por escopo deste projeto a análise e definição do impacto das variáveis inerentes e associadas ao processo de vácuo em unidades condensadoras de equipamentos condicionadores de ar do tipo *split* com capacidades entre 10541,2 W (36 kBtu/h) e 26352,9 W (90 kBtu/h), com descarga de ar vertical, manufaturados na unidade fabril de Canoas – Rio Grande do Sul da empresa Springer Carrier Ltda. O projeto abordará ainda uma contribuição para constituir uma metodologia para dimensionamento e modelagem de sistema de desidratação de aparelhos de ar condicionado e, partindo do sistema atual, comprovar o uso de boas práticas na obtenção e medição do vácuo em equipamentos da referida linha de montagem.

## 2. DESENVOLVIMENTO

### 2.1 Revisão bibliográfica

#### 2.1.1 Generalidades sobre a tecnologia do vácuo

Vácuo é definido da seguinte forma: pressões abaixo da pressão atmosférica local, ou alternativamente, qualquer pressão menor que a pressão atmosférica local ou ambiente (Harris 2005). Em função desta definição, é importante que se diga, que as escalas utilizadas mais comumente na medição do nível de vácuo (escalas de pressão portanto) são escalas absolutas, não relativas à pressão atmosférica.

Também conhecido em unidades de manufatura como processo de desidratação, a tecnologia do vácuo, segundo Degaspero et al (2006) é utilizada em muitas etapas de fabricação e transformação de diversos produtos, mas também tem intensa utilização na pesquisa, tanto básica como aplicada. Os sistemas de vácuo têm inúmeras formas e dimensões decorrentes das diferentes tarefas e quantidades de gases presentes nos processos realizados à baixa pressão. Esta diversidade dos sistemas de vácuo faz com que seus cálculos e projetos sejam geralmente distintos entre si e entende-se que na maior parte deles de difícil execução, particularmente quando os detalhes inerentes a cada caso devem ser observados e levados em consideração. Do ponto de vista prático, para uma escolha adequada da instrumentação utilizada nas instalações de sistemas de vácuo, é fundamental uma compreensão dos conceitos básicos envolvidos no processo de bombeamento de gases e vapores em baixa pressão.

Ainda a respeito da amplitude de aplicação da tecnologia de vácuo, são encontradas entre aplicações industriais e científicas, variação em torno de 15 ordens de grandeza, ou seja, da pressão atmosférica ao nível do mar de aproximadamente  $10^5$  Pa ( $10^3$  mbar) até pressões da ordem de  $10^{-10}$  Pa ( $10^{-12}$  mbar). Mais precisamente, é aplicada desde processos próximos da atmosfera padrão, definida como 101325 Pa (1013,23 mbar) até situações bastante particulares, geralmente em laboratórios, onde foram alcançadas pressões da ordem de  $10^{-12}$  Pa ( $10^{-14}$  mbar).

#### 2.1.2 Classificações do grau de vácuo utilizado

A Sociedade Americana dos Engenheiros de Aquecimento, Refrigeração e Condicionamento de Ar, em ASHRAE (2005) postula que o grau de vácuo obtido deve ser classificado conforme a tabela a seguir:

**Tabela 2.1 – Classificação ASHRAE para grau de vácuo**

<b>Vácuo baixo</b>	101,325 a 3,4 kPa
<b>Vácuo médio</b>	3,4 kPa a 130 mPa
<b>Alto vácuo</b>	130 a 0,13 mPa
<b>Muito alto vácuo</b>	130 a 0,13 $\mu$ Pa
<b>Ultra alto vácuo</b>	0,13 $\mu$ Pa e abaixo

Serão vistos, no capítulo 2.2 deste ensaio, os níveis recomendados para vácuo em equipamentos objeto deste estudo, mas por hora, pode-se afirmar que a classificação para processos de desidratação de aparelhos de ar condicionado é de vácuo médio segundo a ASHRAE, órgão reconhecido mundialmente como referência em estudo de refrigeração e condicionamento de ar.

### 2.1.3 Propriedades psicrométricas

Psicrometria é definida como o estudo das misturas de ar e vapor d'água (Marcos Jesus et al. 2002) e se acha sempre presente na elaboração de projetos e na execução e manutenção das instalações de conforto ambiental e de ar condicionado. Entretanto, apesar desta relação com os equipamentos em estudo, no âmbito do processo de vácuo as propriedades psicrométricas são importantes na determinação da quantidade de umidade do ar na parte interna dos circuitos do equipamento, o ar em processo por assim dizer.

As propriedades psicrométricas, na maioria dos casos, são obtidas através de cartas. Estas cartas, denominadas diagramas ou cartas psicrométricas, são definidas para cada pressão barométrica e de posse de alguns dados básicos, pode-se determinar a umidade relativa e a umidade absoluta do ar em processo, informações importantes na determinação dos parâmetros do sistema de desidratação. A redução da quantidade de vapor de água (redução da umidade absoluta) é sem dúvidas o grande objetivo da realização de vácuo no sistema, uma vez que a existência de vapor d'água na parte interna do sistema é invariavelmente prejudicial ao bom funcionamento de seus componentes, seja pela degradação das propriedades lubrificantes do óleo do compressor seja pela reação química que gera óxidos e alta acidez nos circuitos.

### 2.1.4 Pressão de vapor

Principal preocupação no dimensionamento de sistemas de vácuo, a eliminação de água presente no ar em processo dá-se, na grande maioria dos casos, através do bombeamento do ar úmido, o que não garante a remoção de água nos estados líquido e sólido, no caso destes existirem no sistema.

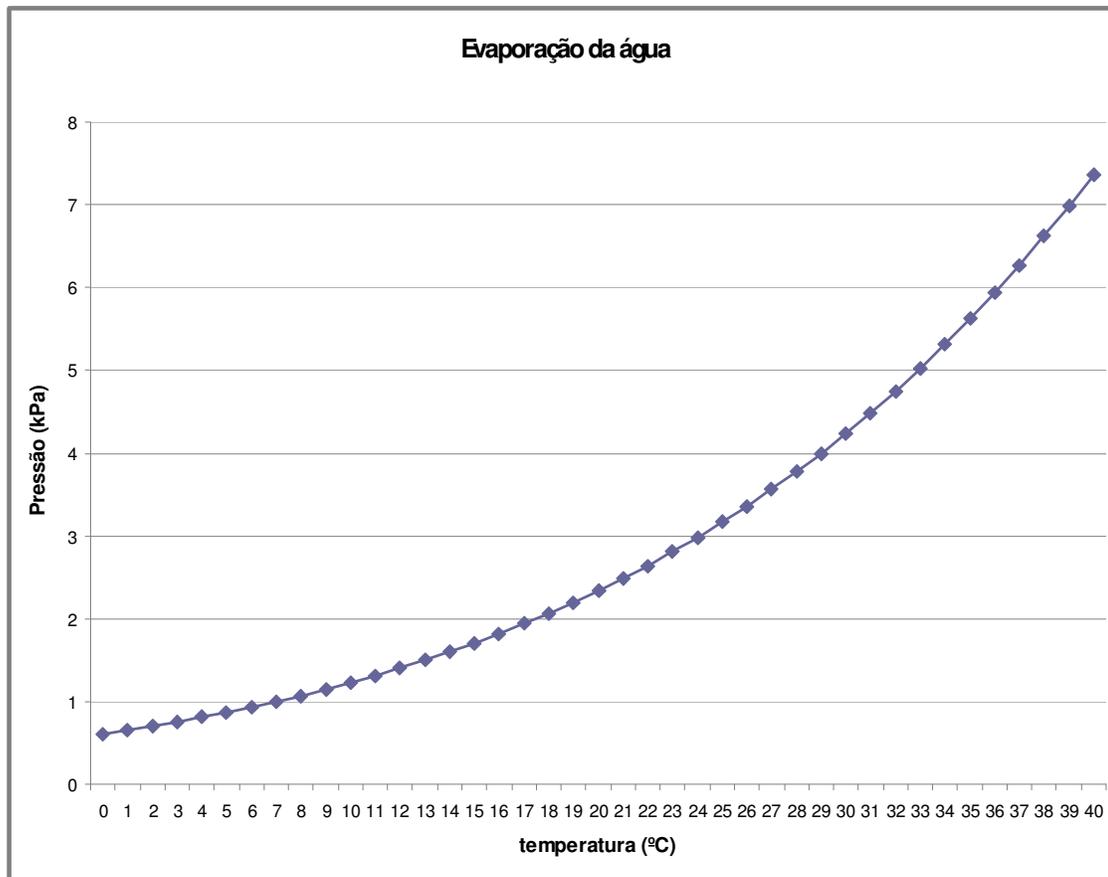
Tomando-se a lei de Dalton, que postula que a pressão total de uma mistura (no caso estudado: ar atmosférico) em determinado volume à determinada temperatura é igual a soma das pressões parciais de seus componentes no mesmo volume à mesma temperatura.

$$P_{ar} = P_n + P_o + P_a + P_{h_2o} + P_x \quad [Pa] \quad (1)$$

A equação acima representa a pressão total do ar úmido, onde  $P_n$  representa a pressão parcial de nitrogênio,  $P_o$  a pressão parcial de oxigênio,  $P_a$  a pressão parcial de argônio,  $P_{h_2o}$  a pressão parcial do vapor de água presente na mistura e  $P_x$  a pressão parcial de componentes minoritários presentes no ar.

Em função de tal problema, torna-se imprescindível a correta especificação da pressão final de vácuo a ser alcançada no sistema, pois assumindo-se a temperaturas com pequena variação relativa (temperatura ambiente) pode-se garantir a total vaporização, ou mesmo sublimação da água, quando alcançadas pressões suficientemente baixas.

É mostrado abaixo, gráfico relacionando pressão de vaporização e temperatura do ar em processo.



**Figura 2.1 - Pressão (kPa) X temperatura vaporização (°C)**  
 fonte: *Georgia State University - 2005*

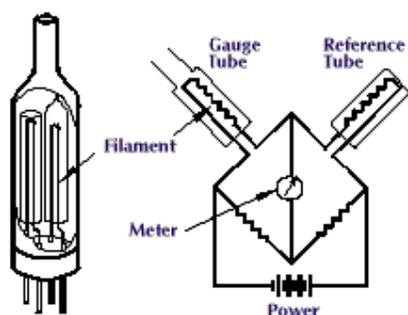
### 2.1.5 Medição de Vácuo

Segundo Schneider et al (2003) a pressão é uma propriedade local do fluido, e para uma situação estática apresenta forte dependência da posição, apesar de não ser dependente da direção. É sabido que existem variados dispositivos para se mensurar pressão, classificados por White (2002) conforme segue:

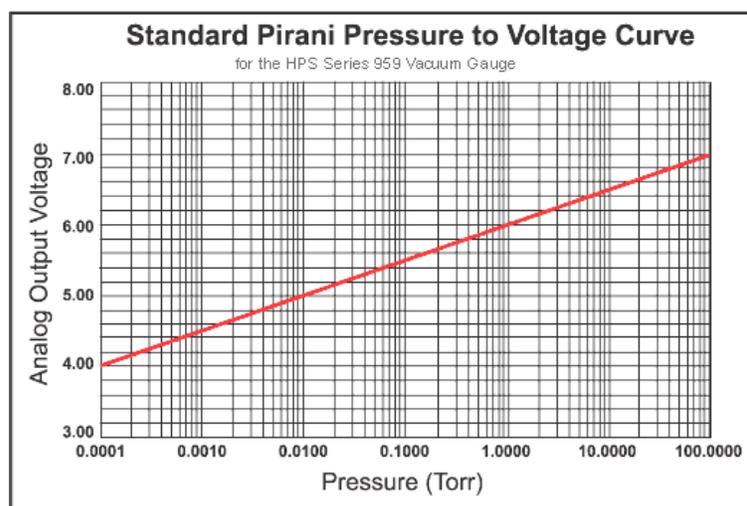
- Baseados na gravidade: barômetros, manômetros, pistão de peso morto.
- Deformação elástica: tubo de Bourdon, diafragma, extensômetro (*strain-gage*)
- Comportamento de gases: compressão de gás (McLeod), condutância térmica (Pirani), impacto molecular (Knudsen), ionização, condutividade térmica, etc.
- Saída elétrica: resistência (Bridgman), extensômetro, capacitivo, piezoelétrico, frequência de ressonância, etc.

Entretanto, no caso particular do vácuo, usualmente utilizam-se medidores de pressão por condutância térmica, com grande destaque para o tipo Pirani cujo princípio de operação compreende que uma variação de pressão no gás medido causa uma variação proporcional na taxa de calor trocado entre este e um filamento aquecido, cuja variação na condutância térmica gera uma diferença de potencial elétrico que pode ser medida eletronicamente pelo instrumento através de uma construção bastante comum chamada ponte de Wheatstone.

A figura 2.2 mostra esquematicamente o funcionamento de vacuômetros do tipo Pirani e, complementarmente, a figura 2.3 mostra a relação entre a tensão de saída e a pressão do gás medido, indicando aumento da sensibilidade do instrumento ao passo que se reduz a pressão.



**Figura 2.2 - Componentes de funcionamento de sensor Pirani – fonte: Kurl J. Lesker Co. – Basic vacuum concepts 2008**



**Figura 2.3 – Vacuômetro Pirani: relação logarítmica entre tensão de saída (V) e pressão absoluta (Torr) – fonte: BOC Edwards P959 datasheet**

Apesar da larga utilização dos medidores Pirani na indústria de refrigeração, atualmente também são utilizados na tecnologia do vácuo, manômetros de Bourdon, piezoelétricos, manômetros de capacitância, termopares, manômetros por diafragma e de ionização.

### 2.1.6 Gás *ballast*

Constituído usualmente por um gás inerte,  $N_2$  por exemplo, o propósito da utilização do gás *ballast* ou gás de reação é evitar a mistura da umidade com o óleo da bomba de vácuo.

Enquanto são evacuados, alguns vapores condensáveis podem chegar à bomba e quando chegam, degradam o óleo que lubrifica e impõe vedação à bomba causando falhas de bombeamento e de processo. Este gás é utilizado para remover substâncias como água e álcool condensados e funciona através de um mecanismo que controla certa quantidade de ar que chega à bomba e atinge áreas de temperatura elevada na própria bomba de vácuo (70 a 80°C) evitando que a evaporação deste componente entre em contato com o óleo. Através de uma válvula especialmente desenvolvida, as substâncias indesejáveis são expelidas, aumentando a vida útil do óleo da bomba.

Apesar dos benefícios, a utilização deste tipo de gás tem implicações comprovadamente negativas no que diz respeito a pressão final de vácuo obtida pela bomba utilizada, pois o uso deste reduz a vazão da bomba, aumentando o tempo de operação necessário para a obtenção da mesmo nível de vácuo no sistema.

### 2.1.7 Parâmetros fundamentais para a modelagem

#### Condutância

A resistência ao escoamento das moléculas de gás imposta pelos componentes da linha de bombeamento e da câmara de vácuo tem considerável influência sobre a vazão de bombeamento efetiva e a pressão final do sistema. Tratando-se de vácuo, segundo Harris et al. (2005) é sempre preferível efetuar os cálculos em função da Condutância (C) em relação a Resistência (R).

$$C_{a-b} = \frac{1}{R_{a-b}} \quad (2)$$

*Throughput* é segundo Harris, uma variável largamente utilizada em tecnologia do vácuo e relaciona a vazão volumétrica em determinado ponto com a pressão de vácuo obtida, da seguinte forma:

$$Q_a = P_a \cdot \frac{\partial V}{\partial t} \quad [\text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}] \quad (3)$$

Onde  $Q_a$  é o *throughput* no ponto “a”,  $P_a$  é a pressão no ponto “a” e  $V$  é o volume de ar que atravessa a seção em determinado instante.

Esta variável torna-se importante, a medida que se quer conhecer a energia envolvida no transporte das moléculas de gás, por unidade de tempo.

Assim, pode-se definir Condutância entre pontos “a” e “b” da linha de bombeamento da seguinte forma:

$$C_{a-b} = \frac{Q}{P_a - P_b} \quad [\text{m}^3/\text{s}] \quad (4)$$

A condutância de um sistema é fortemente dependente do tipo de escoamento nele envolvido, o que leva a definição de outro parâmetro para a caracterização de seu escoamento, o número adimensional de Knudsen (utilizado largamente em tecnologia do vácuo acompanhado ou não da definição do número de Reynolds):

$$Kn = \frac{\lambda}{l} \quad (5)$$

Onde  $\lambda$  é o conhecido livre caminho médio (usualmente *mean free path*) e  $l$  é uma distância típica do sistema, usualmente o diâmetro da tubulação da linha de bombeamento.

#### Velocidade de bombeamento efetiva

Velocidade ou vazão efetiva da bomba, outro parâmetro importante na definição e modelagem de sistemas de vácuo segundo Degasperri (1999), relaciona-se com a condutância e com a velocidade nominal da bomba da seguinte forma:

$$\frac{1}{S_{ef}} = \frac{1}{C_{total}} + \frac{1}{S_{bomba}} \quad (6)$$

Isto estabelece a velocidade efetiva da bomba ( $S_{ef}$ ) conectada à câmara através de uma linha de bombeamento com condutância total ( $C_{total}$ ).

## 2.2 Apresentação do Problema

### 2.2.1 Falhas relacionadas

É sabido que sistemas de vácuo mal-dimensionados, ou com problemas de manutenção geram vácuo de má qualidade nos equipamentos de ar condicionado, que por sua vez podem vir a ter problemas de funcionamento, falhas de componentes, perdas de capacidade frigorígena e de eficiência, que causam transtornos ao consumidor, seja qual for a aplicação do equipamento.

Em análises realizadas na linha de montagem em questão, pode se constatar que a grande maioria das falhas dos equipamentos pode estar relacionada a uma baixa qualidade do vácuo realizado. Isso não quer dizer necessariamente que os produtos sejam mal evacuados na fábrica em questão (apesar de esta ser uma das possibilidades) em função de que a instalação dos equipamentos tipo *split* demanda a realização de vácuo na unidade evaporadora, o que insere uma variável a mais no processo a ser considerada.

No gráfico abaixo podem ser vistas as falhas ocorridas (atendidas em garantia) nos aparelhos produzidos na linha de montagem alvo deste estudo, contemplando todo o ano de 2008, até o presente momento.

#### falhas condensadoras 2008 YTD

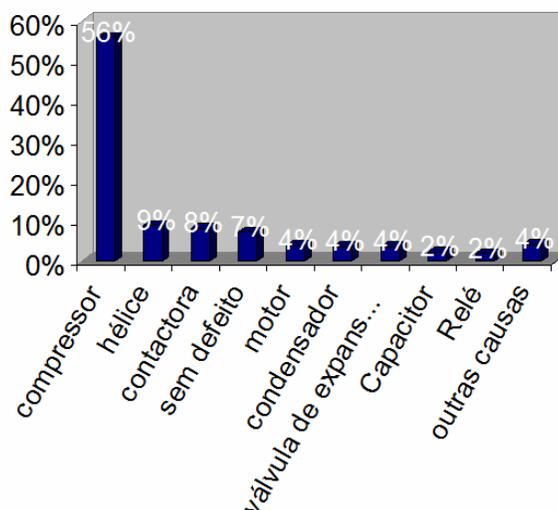


Figura 2.4 – Percentagem de falhas de componentes no ano 2008

**Tabela 2.2 – Tipos de falhas, exemplificando defeitos relatados**

Falhas em componentes	defeitos relatados		
Compressor	Queimado	Curto-circuito	Travado
Hélice	Quebrada	Empenada	Desbalanceada
Contactora	Queimada	Curto-circuito	Quebrada
Sem defeito	Tensão incorreta	Dimensionamento incorreto	Falta de gás refrigerante
Motor	Queimado	Travado	Curto-circuito
Condensador	Vazamento	Congelando	Obstruído
Válvula de expansão, reversão ou serviço	Entupimento	Vazamento	Erro de montagem
Capacitor	Queimado	Invertido	Curto-circuito
Relé	Queimado	Curto-circuito	Quebrado
Outras causas	Troca do produto	Chassi amassado	Adesivo rasgado

Através dos dados obtidos, pode-se concluir que falhas de componentes que podem estar relacionadas a vácuo ruim (compressor travado ou queimado, condensador congelando ou obstruído e válvulas com entupimento) representam cerca de 64% do total de notificações pagas em garantia na referida empresa durante o ano de 2008. Este cenário reflete uma urgência de se revisar os processos de obtenção de vácuo, internos, a medida que só é possível cobrar melhorias das empresas instaladoras se o processo estiver garantido e certificado desde a fábrica, e externos, uma vez que se acredita que a finalização da instalação possa estar gerando o alto número de falhas por erros de procedimento. As causas do mau procedimento de evacuação por parte dos instaladores podem ser explicadas por diversos fatores, falta de conhecimento, falta de equipamentos adequados, falta de manutenção, entre outros, e algumas formas de melhorar a qualidade deste serviço serão discutidas no capítulo 3 do trabalho, na seção de sugestões para trabalhos futuros, pois entende-se que não fazem parte do escopo deste ensaio.

### 2.2.2 Sistema atual de obtenção de vácuo

A linha de montagem em questão dispõe de produtividade máxima de 220 aparelhos por turno de trabalho. Operando a capacidade máxima, portanto com demanda para 220 aparelhos/turno, sendo o turno padrão de operação considerado como 8 horas, ou 480 minutos, pode-se observar que o *Takt time* ou intervalo entre a produção de cada aparelho, é de aproximadamente 2 minutos e 11 segundos. Para tal, planejando-se o tempo de ciclo (ou tempo máximo por operação) em 95% da demanda (definida pelo *takt time*), conforme orientação da filosofia *Lean Manufacturing* (Rotaru – 2008) conclui-se que a operação de vácuo, assim como todas as outras operações, deve obedecer a um tempo máximo de ciclo de

2 minutos e 4 segundos. Isto aparentemente poderia tornar-se um problema para a obtenção da pressão final de vácuo exigida, tendo em vista que é um tempo relativamente curto para a operação de bombeamento. Todavia, este problema é facilmente contornado ao passo que o sistema possui três máquinas de vácuo em paralelo, realizando o processo simultaneamente em três diferentes aparelhos e desta forma pode-se aumentar significativamente o tempo de evacuação.

Abaixo segue imagem explicativa da atual estação de vácuo na linha de montagem.

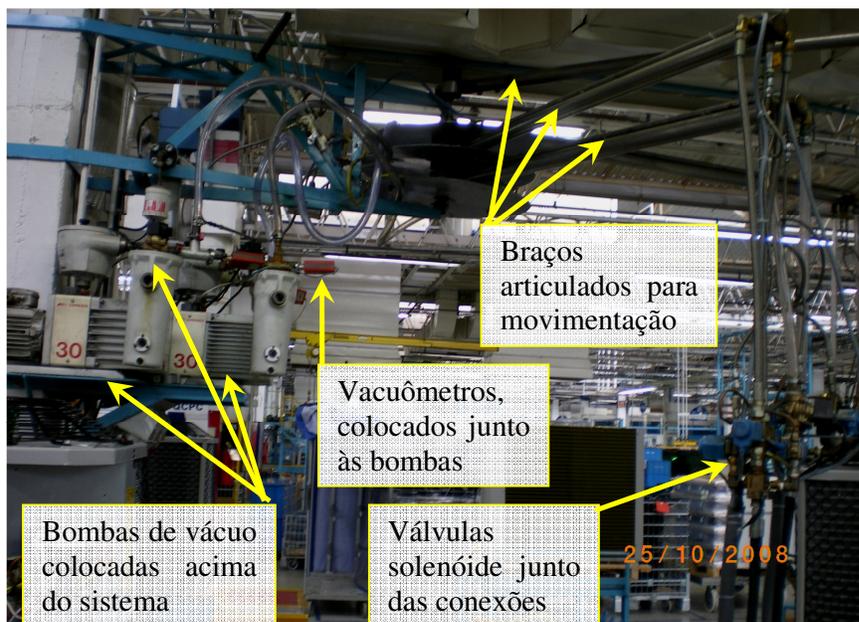


Figura 2.5 – Estação de vácuo, linha de montagem 38C/H/9C

### 2.2.3 Definição do equipamento atual

Dispondo de três sistemas de bombeamento idênticos, a linha foi concebida com bombas de vácuo com vazão de  $0,014 \text{ m}^3/\text{s}$  ( $30 \text{ ft}^3/\text{min}$ ), vacuômetros do tipo Pirani com mostrador digital, instalado sobre a bomba, ambos fabricados pela BOC EDWARDS Co., além de válvulas de bloqueio, mangueiras para vácuo e conexões específicas para esta prática. Os parâmetros do sistema de controle são dados a seguir através de um diagrama de blocos:

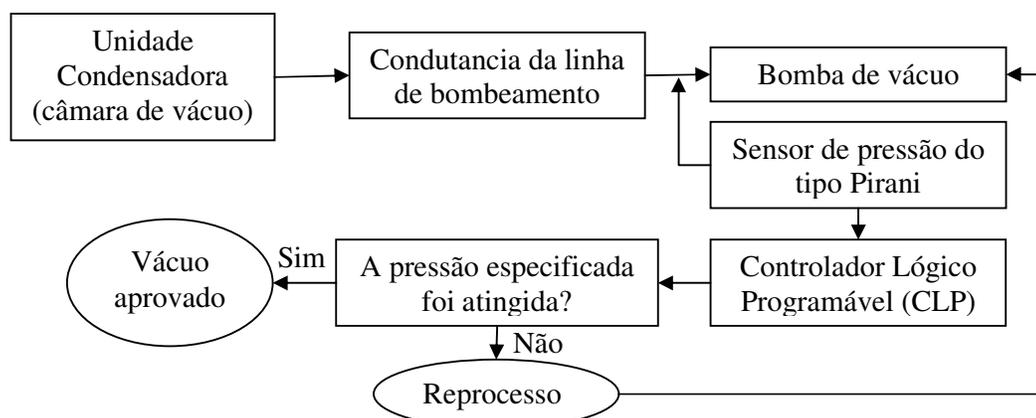


Figura 2.6 – Diagrama de blocos do sistema de aprovação para a carga de gás

### 2.2.5 Análise da especificação ASHRAE para vácuo

Mesmo quando é seguida em detalhes a especificação da ASHRAE para evacuação de aparelhos de ar condicionado, é inevitável que se questione o por quê desta pressão ter sido definida em um nível tão reduzido. Apesar de não ter sido encontrada explicação relevante, procurou-se, como será mostrado a seguir, definir uma forma de estimar a quantidade de umidade restante nos circuitos a partir da especificação da pressão. Essa umidade absoluta foi comparada com dados de fabricante de compressores, para se verificar a relação entre as especificações, e assim definir se a pressão a ser atingida é adequada, e isto significará ser apenas suficiente, não estando excessivamente baixa, pois esta segunda situação implicaria em gasto excessivo de energia, uma vez que a obtenção de níveis de vácuo torna-se cada vez mais cara e demorada a medida que se baixa a pressão alvo.

**Tabela 2.3 – Especificações para obtenção de vácuo – Fonte: ASHRAE Refrigeration 2006 (SI units)**

Componente	Método de desidratação
Aletados e tubos	Forno a 121°C, jato de ar seco a -57°C
Aletados evaporadores	
Pequenos	jato de ar seco à -57°C do ponto de orvalho, 240 seg.
Grandes	jato de ar seco à -57°C do ponto de orvalho, 240 seg.
Evaporadores/condensadores	Forno a 149°C, 1h, jato de ar seco
Unidades de condensação	Jato de ar seco
Unidades de ar condicionado	Evacuar até 32 Pa 4h de aquecimento por ventilação, 0,5h de vácuo
Refrigeradores	Forno a 121°C, aquecimento por ventilação, vácuo
Congeladores	-57°C ponto de orvalho, ar ambiente, -40°C ponto de orvalho, jato de ar

Considerando 32 Pa como nível de vácuo ótimo para condicionadores de ar, segundo a tabela acima e tomando-se como ar em processo inicial como mistura de ar seco e vapor d'água através dos parâmetros de 60% de umidade relativa e 25°C de temperatura de bulbo seco, inicialmente a pressão de 101325 Pa, pode-se verificar através de carta psicrométrica que a umidade absoluta é de 11,94 g/Kg de ar seco, o ponto de orvalho é de 16,69°C e o volume específico é de 0,8605 m<sup>3</sup>/Kg. Supondo que após o bombeamento a proporção entre a pressão de vapor de água e ar úmido seja conservada, a umidade absoluta do sistema evacuado por ser determinada através da seguinte equação, dada por ASHRAE – Refrigeration, 2006:

$$U = 0,62198 \left( \frac{P_{VS}}{P - P_{VS}} \right) \text{ [kg/kg ar seco]} \quad (7)$$

Onde U representa a umidade absoluta em quilogramas de vapor de água por quilogramas de ar seco,  $P_{VS}$  a pressão de vapor e P a pressão do sistema.

Sendo a proporção entre pressão total e pressão de vapor conservada em 1,88%, a pressão de vapor torna-se 0,6016 Pa, e a umidade absoluta 0,01191 kg de vapor d'água/kg de ar seco. Assumindo a massa específica do ar a esta pressão como 0,000377 kg de ar seco/m<sup>3</sup> conclui-se que o sistema deverá conter 0,00449 g de vapor d'água por metro cúbico.

O maior volume entre as unidades condensadoras em estudo, é de 0,0094 m<sup>3</sup> nas unidades de 26352,9 W (90 kBtu/h) e então tem-se que a quantidade total de vapor de água restante é de 0,422 mg. É sabido que estas unidades são carregadas com 1,050 kg de gás refrigerante, portanto a quantidade de vapor de água será de 0,4019 g/kg de gás refrigerante o que atende a especificação de fabricantes de compressores, que toleram até 25 mg/kg de gás refrigerante, embora não se esteja levando em consideração a quantidade de umidade inserida pelo próprio gás refrigerante.

## 2.3 Análises realizadas e problemas experimentais

### 2.3.1 Validação das situações

A literatura disponível apresenta, apesar de algumas variações nos valores, curvas semelhantes para as possíveis situações dos sistemas evacuados. A seguir, através de experimento prático, demonstrou-se que estas curvas características são válidas para o sistema em questão e seu comportamento pode ser assumido como verdadeiro com todas as implicações desta afirmação.

Algumas considerações devem ser feitas a respeito deste experimento:

1. Realizado no ambiente fabril já mencionado.
2. Umidade no sistema, para fins de análise, foi inserida através de água líquida na quantidade de 10 mL.
3. Vazamento artificial, para fins de análise, foi introduzido na tomada de pressão da linha de descarga do aparelho através da abertura parcial do êmbolo do ventil.

O estudo foi realizado sem que se levasse em conta valores de pressão em relação às especificações anteriormente relacionadas, bombeando-se o sistema até valores relativamente baixos e após 80 segundos desligou-se a bomba de vácuo para que fosse feito o monitoramento de cada situação, observando-se a curva de pressão gerada em cada cenário até a marca de 140 segundos, em sistema desidratado (vácuo), umidade no sistema e vazamento no sistema.

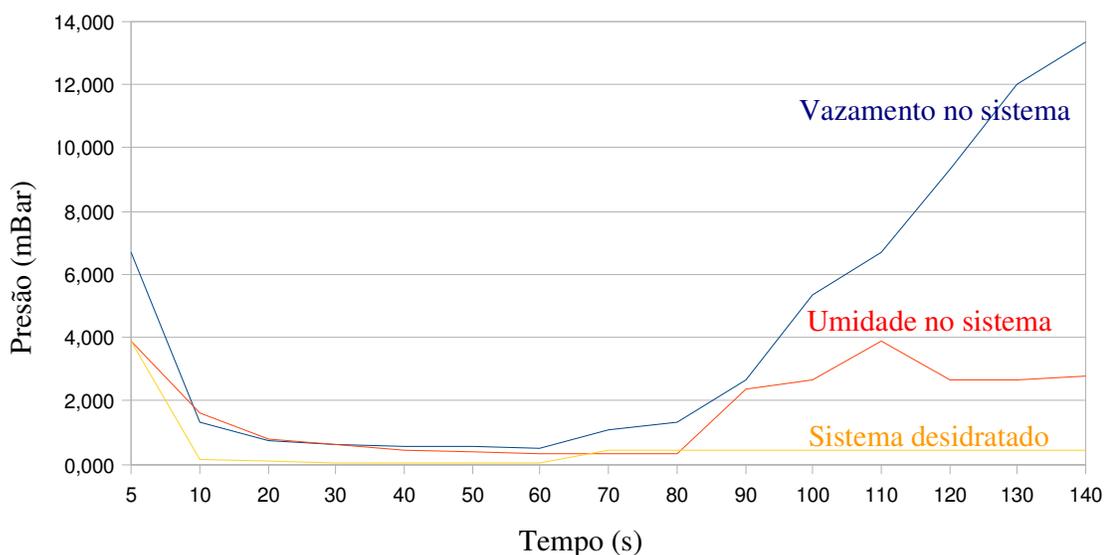


Figura 2.7 – Situações possíveis – Experimento 22/10/2008.

Através do gráfico da figura 2.7 pôde-se verificar a validade das colocações da bibliografia, bem como demonstrar experimentalmente, que o sistema de medição da estação de vácuo comporta-se conforme o esperado frente às situações simuladas neste ensaio.

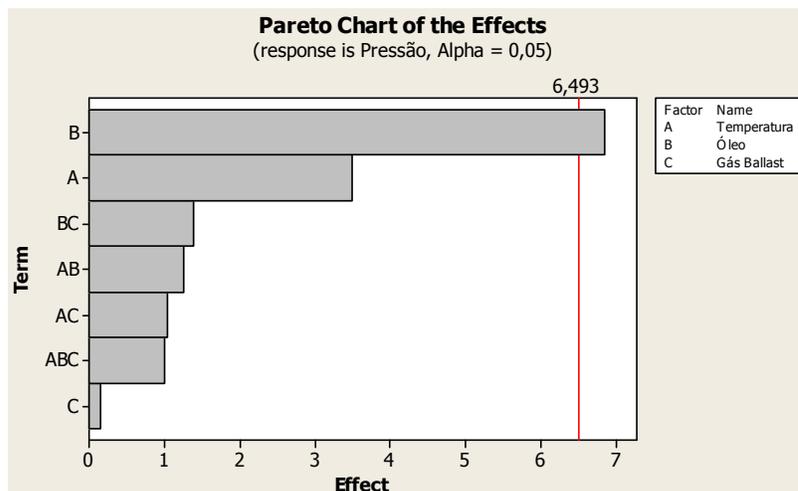
### 2.3.2 Estudo do impacto de variáveis críticas

A fim de investigar o impacto de algumas das variáveis críticas ao processo de desidratação de equipamentos condicionadores de ar, e além desta análise, entender a relação e interação entre estas, realizou-se um experimento com base nas designações do método conhecido como DOE (*Design of Experiments*) fatorial segundo Antony Jiju (2003) a ferramenta correta para este tipo de análise. (Este método é descrito em detalhes no Anexo deste trabalho). Neste âmbito, através de análises qualitativas das variáveis críticas e de constatações a respeito das variáveis passíveis de controle, foram selecionados três fatores, considerados importantes ao processo e também de fácil variação ou medição, e estes foram divididas em dois níveis, por considerar-se que seriam suficientes à análise proposta.

A tabela 2.4 descreve as medições realizadas em ambiente fabril em relação aos parâmetros, sendo C5-T coluna descritiva do fator Temperatura (nível baixo 16°C e nível alto 25°C), C6-T coluna do fator Óleo (nível baixo “Novo” e nível alto “4h de uso”), C7-T coluna do fator Gás *Ballast* (nível baixo “Não” e nível alto “Sim”) e C8 a pressão média em pascais de 3 medições de pressão em cada cenário.

**Tabela 2.4 – roteiro para DOE**

C5-T	C6-T	C7-T	C8
Temperatura	Óleo	Gás Ballast	Pressão
Baixa (16°C)	Novo	Não	28,0
Baixa (16°C)	4h de uso	Sim	32,7
Alta (25°C)	4h de uso	Não	28,9
Alta (25°C)	Novo	Não	21,2
Baixa (16°C)	4h de uso	Não	31,2
Baixa (16°C)	Novo	Sim	24,7
Alta (25°C)	4h de uso	Sim	30,5
Alta (25°C)	Novo	Sim	22,0



**Figura 2.8 – Diagrama de Pareto da resposta de cada um dos fatores e das associações**

O gráfico da figura 2.8 apresenta o forte impacto da variável óleo na obtenção da pressão final de vácuo no sistema, este seguido pela variação na temperatura representam os fatores de maior importância na pressão final. Pode-se verificar também uma baixa importância das variáveis quando associadas.

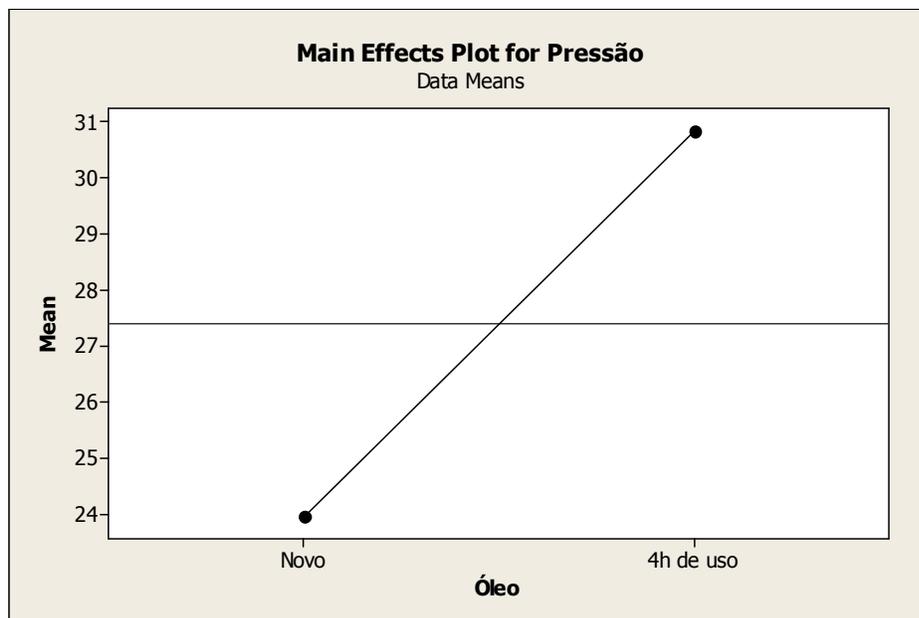


Figura 2.9 – Impacto da variável Óleo no sistema

O gráfico da figura 2.9 mostra um aumento da pressão final obtida, impingido por desgaste decorrente da utilização contínua do mesmo óleo na bomba de vácuo. A variável Óleo foi analisada separadamente das demais uma vez que demonstrou maior impacto no estudo anteriormente realizado.

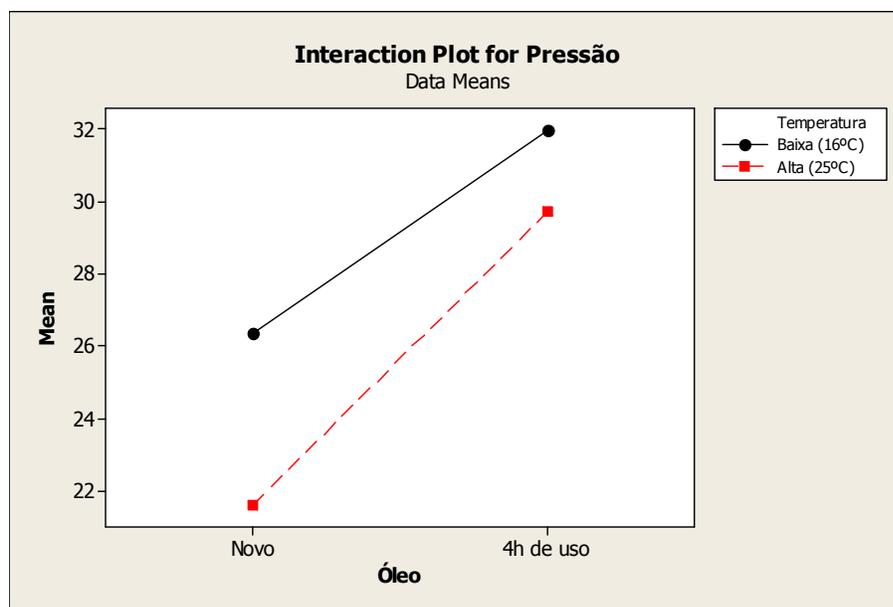
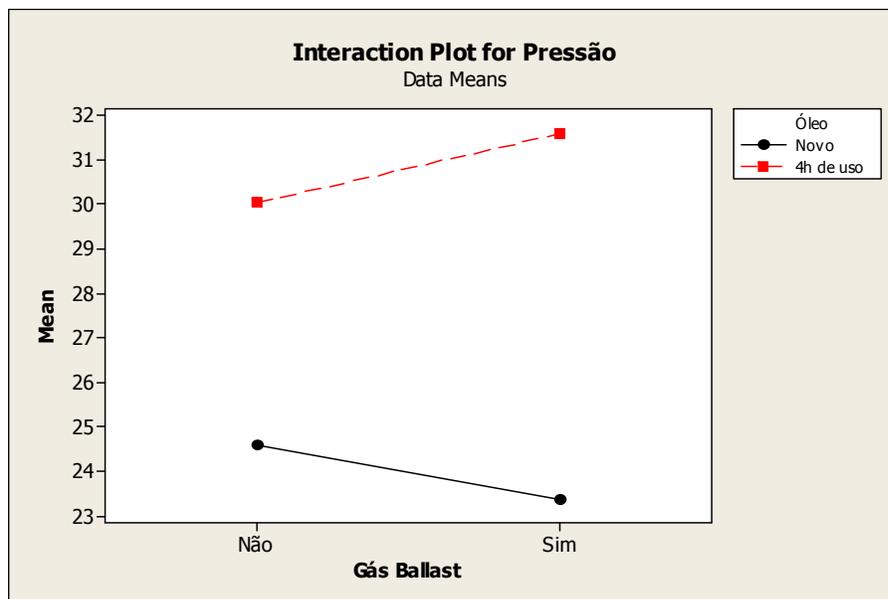


Figura 2.10 - Interação entre Temperatura e Óleo



**Figura 2.11 – Interação entre Óleo e Gás ballast**

Estes gráficos (figuras 2.10 e 2.11) apresentam a interação entre os fatores críticos. Pode-se visualizar relação direta de aumento da pressão final ocasionado por nível alto nos dois fatores no primeiro gráfico (Óleo x Temperatura). Isto nos mostra que a pressão final foi mais reduzida na situação de óleo novo e temperatura mais alta. No segundo gráfico (Óleo x Gás *Ballast*) constata-se relação inversa, mostrando que a pressão atingida é mais baixa no caso de óleo novo e com utilização de gás *ballast*.

Embora se possam verificar valiosas informações a respeito do comportamento do sistema frente aos parâmetros analisados, é sabido que existem diversas outras variáveis envolvidas, não mencionadas nesta análise. Tendo isto em mente, procurou-se determinar o peso dos parâmetros selecionados para este estudo, ou seja, o quanto estes parâmetros explicam as variações na pressão final de vácuo. Os resultados desta análise estatística são demonstrados abaixo, na tabela 2.5. Extraída do mesmo *software* (Minitab) utilizado nas análises ela demonstra que as variáveis em teste explicam 27,4% da variação na pressão de vácuo final nos condicionadores.

**Tabela 2.5 – Impacto integral das variáveis selecionadas no processo**

Estimated Effects and Coefficients for Pressão (coded units)

Term	Effect	Coef
Constant		27,400
Temperatura	-3,500	-1,750
Óleo	6,850	3,425
Gás Ballast	0,150	0,075
Temperatura*Óleo	1,250	0,625
Temperatura*Gás Ballast	1,050	0,525
Óleo*Gás Ballast	1,400	0,700
Temperatura*Óleo*Gás Ballast	-1,000	-0,500

### 2.3.3 Análise de variação da pressão em relação a posição de medição

Partindo do pressuposto que a posição de medição é fator crítico a obtenção de resultados confiáveis nas análises (O' Hanlon, 1989) e mesmo na aprovação do vácuo durante o processo, estudou-se através de análise comparativa de quinze amostras, a diferença de pressões lidas em dois pontos distintos do sistema de vácuo. A diferença entre as pressões medidas junto à bomba de vácuo e entre o compressor e o condensador (linha de descarga do aparelho) deveria representar a interferência da condutância da linha de bombeamento e da própria câmara de vácuo. Inicialmente pode-se imaginar que mesmo havendo diferença entre estas medições, se esta for conhecida para todos os casos, bastaria leva-la em consideração no momento da definição da especificação da pressão final. Entretanto, basta observar o comportamento do sistema para constatar que torna-se impossível saber a quantidade de perdas de carga a cada momento, menos ainda considera-la constante ao longo do tempo.

Abaixo gráfico da comparação entre as medições:

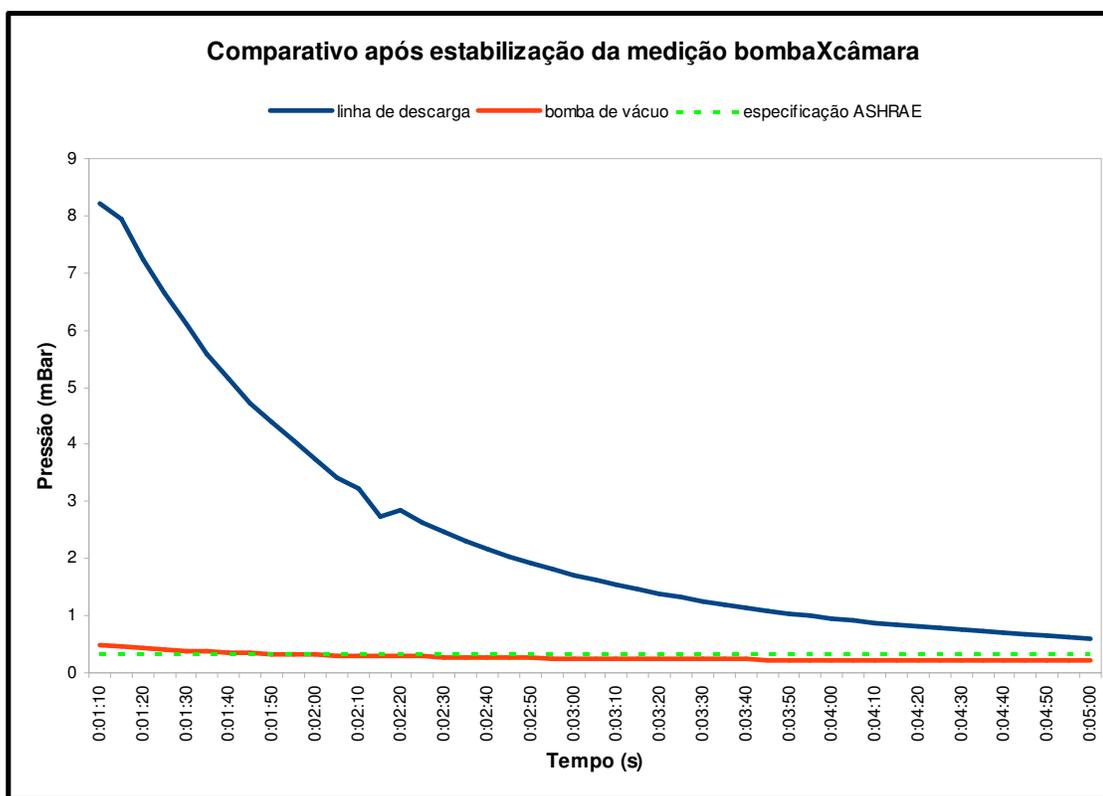


Figura 2.12 – Pressão (mbar) X tempo (s) - experimental

O gráfico da figura 2.12 apresenta clara diferença entre pressões nos pontos selecionados, com destaque ao aproximarem-se da pressão final de vácuo. Isso mostra que a baixa pressão lida na bomba não necessariamente comprova que o aparelho foi evacuado. Somado a isto, existem possibilidades de obstrução da linha de bombeamento ou mesmo das válvulas de conexão, o que iria mascarar o resultado da evacuação, indicando vácuo corretamente efetuado quando apenas as mangueiras e válvulas estariam em vácuo e o aparelho continuaria a pressão atmosférica.

### 3. CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS

Analisando os dados dos experimentos supracitados, pode-se concluir que os parâmetros que foram estudados explicam grande parte da variação do nível final de vácuo no sistema e em função disto, têm alta significância no resultado final do processo. Analisando mais profundamente os experimentos conclui-se que o tempo de utilização do óleo lubrificante da bomba de vácuo se mostrou mais importante ao resultado do que os outros fatores, tendo grande impacto negativo na pressão final a medida que se aumenta o tempo de utilização. Isto denota que a troca regular do óleo nas bombas do sistema em estudo, e por consequência em diversos sistemas que apresentam similaridade com o objeto destas análises, é de fundamental importância para a obtenção de pressões suficientemente baixas nos equipamentos de condicionamento de ar. Também é importante destacar que poderia ser esperado um impacto maior do fator temperatura, entretanto as observações só se fizeram possíveis entre 16°C e 25°C, faixa que, embora abrangente em relação a variação de temperaturas na cidade onde está situada a unidade fabril em estudo, pode não ter impactado nos resultados significativamente pois seria necessária uma variação maior entre os níveis deste fator para que fossem alteradas as propriedades psicrométricas do ar em processo.

Outro ponto fundamental a ser verificado nos experimentos deste estudo é que a diferença entre as medições de pressão durante o bombeamento, na bomba e no equipamento mostrou-se grandemente significativa, o que mostra a importância de se verificar a pressão de vácuo diretamente no ponto mais crítico do sistema, para que se garanta a remoção efetiva dos gases não condensáveis e da umidade presente do ar em bombeamento. Ainda a respeito do gráfico apresentado na figura 2.12, verifica-se que na média das amostras medidas, a pressão especificada pela ASHRAE não foi atingida, o que é preocupante pois como foi demonstrado no capítulo 1 deste ensaio, apenas quando o sistema atinge a pressão de 32 Pa pode-se esperar que a quantidade absoluta de umidade no ar em processo chegará a níveis aceitáveis para não comprometer os componentes críticos do equipamento. Para resolver esta situação, além da imediata alteração do ponto de medição de vácuo, propõe-se um aumento no tempo de bombeamento até que se melhorem as condições que de início do processo, pois foram verificadas diversas oportunidades de melhoria nos processos anteriores ao vácuo, tais como uso de água para verificação de vazamento (tanques de submersão para teste de vazamento) o que insere umidade ao sistema, o armazenamento de serpentinas antes da montagem (mostrada no anexo A) que pode resultar em acúmulo de particulados e mesmo mais umidade dentro dos sistemas.

Entende-se que uma das ações para controle deste nível de umidade pode ser a implementação de auditorias periódicas da umidade nos equipamentos, uma vez que várias das variáveis interferentes nos processos não são conhecidas ou monitoradas, a exemplo da umidade absoluta no ar inicial, a proporção de componentes do ar, variações na alimentação elétrica das bombas, etc. Isto inicialmente implicaria, provavelmente, em rejeições de lotes de equipamentos já evacuados, resultando em re-processo e por conta disto redução da produtividade daquela linha de montagem, o que é preocupante do ponto de vista financeiro, mas entende-se que implicaria em ganhos de qualidade o que na seqüência da utilização reduziria a quantidade de falhas nos componentes críticos. Dito isto, fica aqui a sugestão de estudo para trabalhos futuros, para que se compreenda qual a melhor decisão em relação a este ponto, uma vez que a redução de falhas implicaria em gastos maiores em produção, mas gastos menores em garantia.

#### 4. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Degasperi, F.T. - Análise Detalhada de Sistemas de Vácuo, Laboratório do Acelerador Linear do Instituto de Física da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil. Seminário, 1999.

Degasperi, F.T. - Contribuições para análise, cálculo e modelagem de sistemas de vácuo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, São Paulo, Brasil. Tese de doutorado em engenharia elétrica, 2006.

Harris, Nigel - *Modern Vacuum Practice*, McGraw-Hill, 2006.

O'Hanlon, J. F. - *User's guide to vacuum technology*, Wiley-Interscience, 1989.

Schneider, S. P. - Medição de Pressão em Fluidos, Apostila da disciplina de Medições Térmicas do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil, 2003.

White, F. M. - *Mecânica dos Fluidos*, McGraw-Hill, 2002.

Jesus, M. F. - Programa para estimativa das propriedades psicrométricas – Artigo publicado na Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais, Campina Grande, São Paulo, Brasil, v.4, n.1, p.63-70, 2002.

Rotaru, A. - *Teaching Lean Manufacturing Concepts, Annals of Oradea University, Fascicle of Management and Technological Engineering*, Volume VII (XVII), 2008.

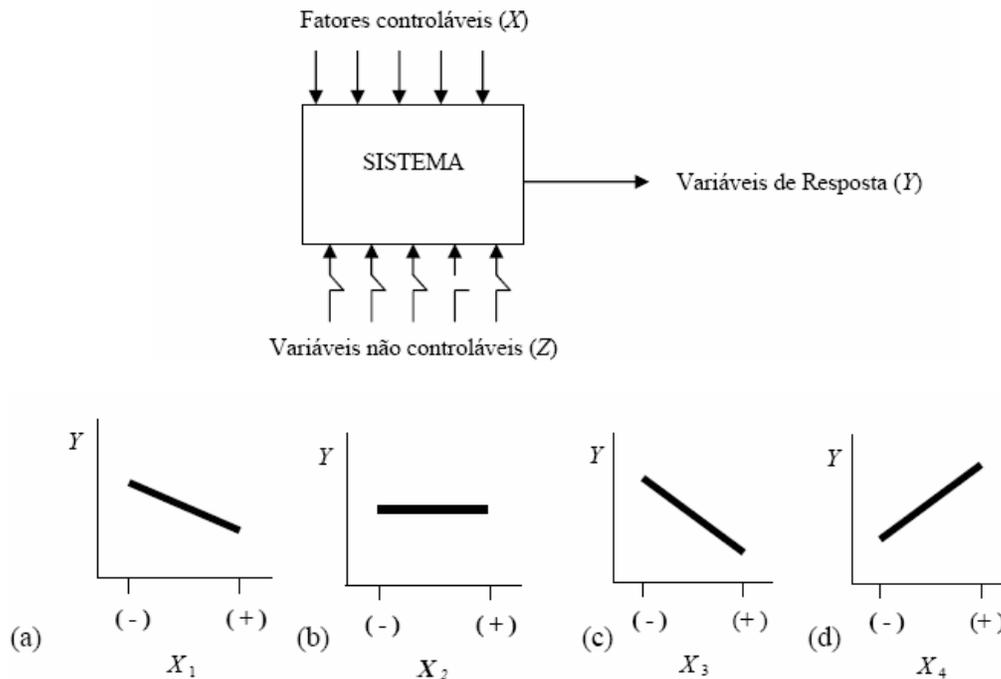
Jiju, A. – *Design of experiments for engineers and scientists*, Butterworth-Heinemann, 2003.

Kurt J. Lesker Co. – dados disponíveis em: <http://www.lesker.com/NewWeb>, acessado em 20/10/2008.

Jim Clark 2008 / Chemguide – dados disponíveis em: <http://www.chemguide.co.uk/physical/phaseeqia/vapourpress.html>, acessado em 15/09/2008.

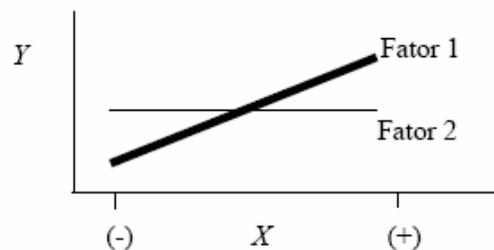
## ANEXO A

Considerações sobre o método DOE (*Design of Experiments*) de projeto de experimentos, fragmentos extraídos de Luis Antônio Usevicius - Implementação da metodologia seis sigma e aplicação da técnica estatística de projeto de experimentos na resolução de problemas e otimização de processos de fabricação, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2004.



**Figura A1 – Análise isolada de cada fator no experimento**

Para análise dos gráficos da figura A1, supõe-se que é desejado o menor valor possível para a variável de resposta Y, no gráfico (a), a inclinação do fator  $X_1$  é negativa, concluindo que o nível (+) do fator  $X_1$  melhorará o resultado. A escolha ótima do equipamento seria:  $X_1$  nível (+);  $X_3$  nível (+);  $X_4$  nível (-). O fator  $X_2$  não tem efeito sobre a variável de resposta. Esta estratégia não considera a possível interação entre os fatores, ilustrada na figura A2. Interações podem ser definidas como o efeito apresentado por um fator em produzir diferentes efeitos na resposta quando combinado em diferentes níveis de outros fatores.



**Figura A2 – Interação entre duas variáveis de experimento**

Apêndice A1 – Imagens ilustrativas de oportunidades de melhoria que atualmente causam problemas na obtenção de vácuo nas unidades estudadas.



**Figura A1.1 – Armazenamento inadequado de serpentinas em etapas anteriores a montagem do aparelho.**



**Figura A1.2 – Tanque para teste de vazamento de serpentinas via submersão em água.**