Campus de São Carlos

**OTIMIZAÇÃO E ANÁLISE DO DESEMPENHO DE SISTEMAS
FRIGORÍFICOS UTILIZANDO O MÉTODO DE SUPERFÍCIE DE
RESPOSTA, O PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS E
ENSAIOS DE PROTÓTIPOS**

Eng° Sidnei José de Oliveira

Orientador: Prof. Dr. Antonio Moreira dos Santos

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

**ESCOLA DE ENGENHARIA
DE SÃO CARLOS**

**OTIMIZAÇÃO E ANÁLISE DO DESEMPENHO DE
SISTEMAS FRIGORÍFICOS UTILIZANDO O MÉTODO
DE SUPERFÍCIE DE RESPOSTA, O PLANEJAMENTO
DE EXPERIMENTOS E ENSAIOS DE PROTÓTIPOS**

Serviço de Pós-Graduação EESC/USP
EXEMPLAR REVISADO
Data de entrada no Serviço: 21 / 08 / 01
Ass.: *Guilherme*

Sidnei José de Oliveira

Tese apresentada à Escola de Engenharia de
São Carlos, da Universidade de São Paulo,
como parte dos requisitos para obtenção do
título de Doutor em Engenharia Mecânica.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Antonio Moreira dos Santos

DEDALUS - Acervo - EESC

31100036745

São Carlos
2001

Class.	TFSE-EESC
Cott.	4097
Tombo	T0210/01

st 1199197

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca - EESC/USP

O48o Oliveira, Sidnei José de
Otimização e análise do desempenho de sistemas
refrigeríficos utilizando o método de superfície de
resposta, o planejamento de experimentos e ensaios de
protótipos. -- São Carlos, 2001.

Tese (Doutorado) -- Escola de Engenharia de São
Carlos-Universidade de São Paulo, 2001.
Área : Engenharia Mecânica.
Orientador: Prof. Dr. Antonio Moreira dos Santos.

1. Refrigeração. 2. Planejamento de experimentos.
3. Superfície de resposta. 4. Otimização. 5. Análise de
variância. 6. Métodos estatísticos. 7. Projeto. 8. Tubo
capilar. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **SIDNEI JOSÉ DE OLIVEIRA**

Tese defendida e julgada em 20-06-2001 perante a Comissão Julgadora:

Prof. Dr. **ANTONIO MOREIRA DOS SANTOS (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

Prof. Assoc. **REGINALDO TEIXEIRA COELHO**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

Prof. Dr. **ADEMIR JOSÉ PETENATE**
(Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP)

Prof. Dr. **JORGE ALBERTO ACHCAR**
(Instituto de Ciências Matemáticas e Computação/USP)

Prof. Tit. **SEBASTIÃO CARDOSO**
(Universidade de Taubaté - UNITAU)

Prof. Associado **ARTHUR JOSÉ VIEIRA PORTO**
Coordenador do Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Mecânica

JOSÉ CARLOS A. CINTRA
Presidente da Comissão de Pós-Graduação

O ser humano se transforma ao longo de toda a sua vida, entretanto, seus traços básicos de caráter e personalidade são adquiridos na sua infância até a idade de cinco a seis anos.

Dedico este trabalho a...

Benedita Castilho da Silva (Vó Dita) e

Gabriel Martins da Silva (Vô Bié, in memorian).

AGRADECIMENTOS

Agradeço à MDG Indústria e Comércio, nas pessoas dos sócios proprietários Edmeu Valentim Gomes e Joni Roberto Gomes, por colocar a estrutura de sua empresa a minha disposição no desenvolvimento deste trabalho. Agradeço também a todos os seus funcionários, e em especial a João Mendonça pelo trabalho de montagem do equipamento aqui estudado.

Agradeço ao Prof. Dr. Jorge Alberto Achcar pelas palavras de incentivo, que me fizeram concluir este trabalho ao entender que a obstinação é a melhor arma contra a crítica leviana.

Agradeço ao Prof. Dr. Antônio Moreira dos Santos pela confiança em minha força de trabalho.

SUMÁRIO

1	- INTRODUÇÃO.....	1
2	- OBJETIVO	7
3	ATUAL ESTADO DA ARTE	9
4	- METODOLOGIA.....	27
4.1	- <i>Resumo Teórico.....</i>	28
4.2	- <i>Estratégia de Otimização.....</i>	37
5	- ENSAIO	39
5.1	- <i>Descrição do Equipamento.....</i>	39
5.1.1	- Compressor	40
5.1.2	- Condensador.....	40
5.1.3	- Tubo Capilar.....	41
5.1.4	- Evaporador.....	41
5.2	- <i>Procedimento Experimental.....</i>	43
5.3	- <i>Resultados Experimentais.....</i>	47
6	- ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	53
6.1	- <i>Fase 1: Especulação Inicial.....</i>	53
6.2	- <i>Fase 2: Procura pela Região do Ponto Estacionário.....</i>	58
6.3	- <i>Fase 3: Exploração da Região do Ponto Estacionário.....</i>	61
6.3.1	- Análise da Capacidade de Refrigeração	66
6.3.2	- Análise do Coeficiente de Eficácia	82
6.3.3	- Análise do Superaquecimento	89
6.3.4	- Análise da Temperatura de Descarga.....	95
6.3.5	- Análise do Sub Resfriamento	101
6.3.6	- Análise da Vazão de Refrigerante.....	111
6.3.7	- Análise da Temperatura de Evaporação	116
6.3.8	- Análise da Temperatura de Condensação.....	121
6.3.9	- Resumo dos Resultados.....	126
6.3.10	- Análise de Robustez.....	129
6.3.11	- Análise Conjunta dos Resultados.....	135
7	- CONCLUSÕES, COMENTÁRIOS E SUGESTÕES	145
8	- ANEXO	149
9	- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	156

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – ARTIGOS CLASSIFICADOS POR FERRAMENTA ESTATÍSTICA NA ÁREA DE ENGENHARIA.	11
FIGURA 2 – ARTIGOS CLASSIFICADOS POR FERRAMENTA ESTATÍSTICA NA ÁREA DE ENGENHARIA MECÂNICA.	11
FIGURA 3 – ARTIGOS CLASSIFICADOS POR FERRAMENTA ESTATÍSTICA NA ÁREA TÉRMICA DA ENGENHARIA MECÂNICA.	12
FIGURA 4 – ARTIGOS CLASSIFICADOS POR ANO DE PUBLICAÇÃO E FERRAMENTA ESTATÍSTICA USADA.	12
FIGURA 5 – (A) PLANEJAMENTO FATORIAL COM PONTO CENTRAL. (B) PLANEJAMENTO COMPOSTO CENTRAL.	30
FIGURA 6 – ESQUEMA DO EQUIPAMENTO FRIGORÍFICO.	39
FIGURA 7 – DESENHO ESQUEMÁTICO DO EVAPORADOR.	41
FIGURA 8 – PONTOS ONDE FORAM FEITAS AS MEDIDAS DE PRESSÃO E TEMPERATURA.	43
FIGURA 9 – CIRCUITO ELÉTRICO USADO PARA REGULAR A POTÊNCIA DISSIPADA PELA RESISTÊNCIA ELÉTRICA.	44
FIGURA 10 – DETALHE DA FIXAÇÃO DO SENSOR EM PONTOS DE MEDIDA DA TEMPERATURA DO REFRIGERANTE.	45
FIGURA 11 – ESQUEMA ELÉTRICO PARA A MEDIÇÃO DA POTÊNCIA CONSUMIDA PELO COMPRESSOR.	46
FIGURA 12 – CURVA DE CAPACIDADE FRIGORÍFICA DO COMPRESSOR FORNECIDA PELO FABRICANTE.	48
FIGURA 13 – VALORES DAS VARIÂNCIAS EM FUNÇÃO DAS RESPECTIVAS FONTES DE VARIABILIDADE.	56
FIGURA 14 – VALORES MEDIDOS DA TEMPERATURA AMBIENTE EM FUNÇÃO DA CAPACIDADE FRIGORÍFICA NA FASE 1.	56
FIGURA 15 – SUPERFÍCIE DE RESPOSTA OBTIDA NA FASE 1 COM A VARIÁVEL x_2 EM SEU NÍVEL INFERIOR.	57
FIGURA 16 – SUPERFÍCIE DE RESPOSTA OBTIDA NA FASE 1 COM A VARIÁVEL x_2 EM SEU NÍVEL SUPERIOR.	57
FIGURA 17 – NÍVEIS DAS VARIÁVEIS AO LONGO DO DESENVOLVIMENTO DOS ENSAIOS. OS PONTOS ESCUROS SÃO RELATIVOS AO PLANEJAMENTO DA FASE 1 E OS PONTOS CLAROS SÃO RELATIVOS À FASE 2. A SETA PONTILHADA INDICA A DIREÇÃO QUE PROPORCIONA OS MAIORES INCREMENTOS NA CAPACIDADE FRIGORÍFICA.	59
FIGURA 18 – RESULTADOS OBTIDOS PELOS ENSAIOS FEITOS APÓS A FASE 1 ESTIPULADO NOS NÍVEIS CODIFICADOS.	60
FIGURA 19 – VALORES DA TEMPERATURA AMBIENTE OBTIDOS PARA OS ENSAIOS, EM FUNÇÃO DOS VALORES LIDOS PARA A CAPACIDADE FRIGORÍFICA.	65
FIGURA 20 – VALOR DE VARIÂNCIAS EM FUNÇÃO DAS RESPECTIVAS FONTES DE VARIABILIDADE COM RELAÇÃO À CAPACIDADE FRIGORÍFICA.	67
FIGURA 21 – SUPERFÍCIE GERADA PELO POLINÔMIO NA FORMA CANÔNICA.	73
FIGURA 22 – CURVAS OBTIDAS PARA VALORES CONSTANTES DA VARIÁVEL RESPOSTA E PARA $w_2 = 0$	74
FIGURA 23 – CURVAS OBTIDAS PARA VALORES CONSTANTES DA VARIÁVEL RESPOSTA E PARA $w_3 = 0$	75
FIGURA 24 – CURVAS OBTIDAS PARA VALORES CONSTANTES DA VARIÁVEL RESPOSTA E PARA $w_1 = 0$	75
FIGURA 25 – RESÍDUO OBTIDO PELO AJUSTE PARA A CAPACIDADE FRIGORÍFICA UTILIZANDO O MODELO COMPLETO.	78
FIGURA 26 – RESÍDUO OBTIDO PELO AJUSTE PARA CAPACIDADE FRIGORÍFICA UTILIZANDO O MODELO SIMPLIFICADO.	78
FIGURA 27 – DISTRIBUIÇÃO DE FREQUÊNCIAS DO RESÍDUO DO MODELO SIMPLIFICADO AJUSTADO PARA A CAPACIDADE FRIGORÍFICA.	79
FIGURA 28 – VALORES NORMALIZADOS DO RESÍDUO OBTIDO PELO AJUSTE DA CAPACIDADE FRIGORÍFICA UTILIZANDO O MODELO SIMPLIFICADO.	79

FIGURA 29 – SUPERFÍCIE DE RESPOSTA LEVANTADA PARA A CAPACIDADE FRIGORÍFICA NA REGIÃO DO PONTO ESTACIONÁRIO, COM O COMPRIMENTO DO CAPILAR EM SEU NÍVEL INTERMEDIÁRIO.....	80
FIGURA 30 – CURVA DE NÍVEL LEVANTADA PARA A CAPACIDADE FRIGORÍFICA NA REGIÃO DO PONTO DE MÁXIMO, COM O COMPRIMENTO DO CAPILAR EM SEU NÍVEL INTERMEDIÁRIO.	80
FIGURA 31 – SUPERFÍCIE DE RESPOSTA LEVANTADA PARA A CAPACIDADE FRIGORÍFICA NA REGIÃO DO PONTO DE MÁXIMO MANTENDO A CARGA DE REFRIGERANTE EM SEU NÍVEL INTERMEDIÁRIO.....	81
FIGURA 32 – CURVA DE NÍVEL LEVANTADA PARA A CAPACIDADE FRIGORÍFICA NA REGIÃO DO PONTO DE MÁXIMO MANTENDO A CARGA DE REFRIGERANTE EM SEU NÍVEL INTERMEDIÁRIO.	81
FIGURA 33 - VALOR DAS VARIÂNCIAS EM FUNÇÃO DAS RESPECTIVAS FONTES DE VARIABILIDADE COM RELAÇÃO AO COEFICIENTE DE EFICÁCIA.....	83
FIGURA 34 – DISTRIBUIÇÃO DO RESÍDUO DO MODELO AJUSTADO PARA O COEFICIENTE DE EFICÁCIA EM FUNÇÃO DO VALOR ESTIMADO.	85
FIGURA 35 – DISTRIBUIÇÃO DE FREQUÊNCIA DO RESÍDUO DO MODELO AJUSTADO PARA O COEFICIENTE DE EFICÁCIA.	86
FIGURA 36 – VALORES NORMALIZADOS DO RESÍDUO OBTIDOS PELO MODELO AJUSTADO PARA O COEFICIENTE DE EFICÁCIA.....	86
FIGURA 37 – SUPERFÍCIE DE RESPOSTA LEVANTADA PARA O COEFICIENTE DE EFICÁCIA CONSIDERANDO O COMPRIMENTO DO CAPILAR EM SEU NÍVEL INTERMEDIÁRIO.	87
FIGURA 38 – CURVA DE NÍVEL LEVANTADA PARA O COEFICIENTE DE EFICÁCIA CONSIDERANDO O COMPRIMENTO DO CAPILAR EM SEU NÍVEL INTERMEDIÁRIO.	87
FIGURA 39 – SUPERFÍCIE DE RESPOSTA LEVANTADA PARA O COEFICIENTE DE EFICÁCIA CONSIDERANDO A CARGA DE REFRIGERANTE EM SEU NÍVEL INTERMEDIÁRIO.	88
FIGURA 40 – CURVA DE NÍVEL LEVANTADA PARA O COEFICIENTE DE EFICÁCIA CONSIDERANDO A CARGA DE REFRIGERANTE EM SEU NÍVEL INTERMEDIÁRIO.	88
FIGURA 41 - VALOR DAS VARIÂNCIAS EM FUNÇÃO DAS RESPECTIVAS FONTES DE VARIABILIDADE COM RELAÇÃO AO SUPER AQUECIMENTO.	90
FIGURA 42 – DISTRIBUIÇÃO DO RESÍDUO OBTIDO PELO AJUSTE FEITO PARA O SUPER AQUECIMENTO EM FUNÇÃO DO SEU VALOR ESTIMADO.	92
FIGURA 43 - DISTRIBUIÇÃO DE FREQUÊNCIAS DO RESÍDUO DO MODELO AJUSTADO PARA O SUPER AQUECIMENTO.	92
FIGURA 44 – VALORES NORMALIZADOS DO RESÍDUO OBTIDO PELO POLINÔMIO AJUSTADO PARA O SUPER AQUECIMENTO.	93
FIGURA 45 – SUPERFÍCIE DE RESPOSTA LEVANTADA PARA O SUPER AQUECIMENTO CONSIDERANDO O COMPRIMENTO DO CAPILAR EM SEU NÍVEL INTERMEDIÁRIO.	94
FIGURA 46 – CURVA DE NÍVEL LEVANTADA PARA O SUPER AQUECIMENTO CONSIDERANDO O COMPRIMENTO DO CAPILAR EM SEU NÍVEL INTERMEDIÁRIO.	94
FIGURA 47 - VALOR DAS VARIÂNCIAS EM FUNÇÃO DAS RESPECTIVAS FONTES DE VARIABILIDADE COM RELAÇÃO À TEMPERATURA DE DESCARGA.....	96
FIGURA 48 - DISTRIBUIÇÃO DO RESÍDUO OBTIDO PELO MODELO AJUSTADO PARA A TEMPERATURA DE DESCARGA EM FUNÇÃO DO SEU VALOR ESTIMADO.	98
FIGURA 49 - DISTRIBUIÇÃO DE FREQUÊNCIAS DO RESÍDUO DO MODELO AJUSTADO PARA A TEMPERATURA DE DESCARGA.	98
FIGURA 50 – VALORES NORMALIZADOS DO RESÍDUO OBTIDO PELO POLINÔMIO AJUSTADO PARA A TEMPERATURA DE DESCARGA.	99
FIGURA 51 – SUPERFÍCIE DE RESPOSTA LEVANTADA PARA A TEMPERATURA DE DESCARGA CONSIDERANDO O COMPRIMENTO DO CAPILAR EM SEU NÍVEL INTERMEDIÁRIO.	100

FIGURA 52 – CURVA DE NÍVEL LEVANTADA PARA A TEMPERATURA DE DESCARGA CONSIDERANDO O COMPRIMENTO DO CAPILAR EM SEU NÍVEL INTERMEDIÁRIO.	100
FIGURA 53 - VALOR DAS VARIÂNCIAS EM FUNÇÃO DAS RESPECTIVAS FONTES DE VARIABILIDADE COM RELAÇÃO AO SUB RESFRIAMENTO.	102
FIGURA 54 - DISTRIBUIÇÃO DO RESÍDUO OBTIDO PELO MODELO QUADRÁTICO AJUSTADO PARA O SUB RESFRIAMENTO EM FUNÇÃO DO SEU VALOR ESTIMADO.	104
FIGURA 55 - DISTRIBUIÇÃO DE FREQUÊNCIAS DO RESÍDUO DO MODELO QUADRÁTICO AJUSTADO PARA O SUB RESFRIAMENTO.	105
FIGURA 56 - VALORES NORMALIZADOS DO RESÍDUO OBTIDO PELO MODELO QUADRÁTICO AJUSTADO PARA O SUB RESFRIAMENTO.	105
FIGURA 57 - DISTRIBUIÇÃO DO RESÍDUO OBTIDO PELO MODELO CÚBICO AJUSTADO PARA O SUB RESFRIAMENTO EM FUNÇÃO DO SEU VALOR ESTIMADO.	106
FIGURA 58 - DISTRIBUIÇÃO DE FREQUÊNCIAS DO RESÍDUO DO MODELO CÚBICO AJUSTADO PARA O SUB RESFRIAMENTO.	106
FIGURA 59 - VALORES NORMALIZADOS DO RESÍDUO OBTIDO PELO MODELO CÚBICO AJUSTADO PARA O SUB RESFRIAMENTO.	107
FIGURA 60 – SUPERFÍCIE DE RESPOSTA LEVANTADA PARA O SUB RESFRIAMENTO CONSIDERANDO O NÍVEL $x_2 = -1$ EQUIVALENTE AO COMPRIMENTO DO CAPILAR IGUAL A 2,0M.	108
FIGURA 61 – SUPERFÍCIE DE RESPOSTA LEVANTADA PARA O SUB RESFRIAMENTO CONSIDERANDO O NÍVEL $x_2 = -1$ EQUIVALENTE AO COMPRIMENTO DO CAPILAR IGUAL A 2,0M.	108
FIGURA 62 – SUPERFÍCIE DE RESPOSTA LEVANTADA PARA O SUB RESFRIAMENTO CONSIDERANDO O NÍVEL $x_2 = 0$ EQUIVALENTE AO COMPRIMENTO DO CAPILAR IGUAL A 2,5M.	109
FIGURA 63 – SUPERFÍCIE DE RESPOSTA LEVANTADA PARA O SUB RESFRIAMENTO CONSIDERANDO O NÍVEL $x_2 = 0$ EQUIVALENTE AO COMPRIMENTO DO CAPILAR IGUAL A 2,5M.	109
FIGURA 64 – SUPERFÍCIE DE RESPOSTA LEVANTADA PARA O SUB RESFRIAMENTO CONSIDERANDO O NÍVEL $x_2 = +1$ EQUIVALENTE AO COMPRIMENTO DO CAPILAR IGUAL A 3,0M.	110
FIGURA 65 – SUPERFÍCIE DE RESPOSTA LEVANTADA PARA O SUB RESFRIAMENTO CONSIDERANDO O NÍVEL $x_2 = +1$ EQUIVALENTE AO COMPRIMENTO DO CAPILAR IGUAL A 3,0M.	110
FIGURA 66 – VALOR DE VARIÂNCIAS EM FUNÇÃO DAS RESPECTIVAS FONTES DE VARIABILIDADE COM RELAÇÃO À VAZÃO DE REFRIGERANTE.	112
FIGURA 67 - DISTRIBUIÇÃO DO RESÍDUO OBTIDO PARA O MODELO AJUSTADO PARA A VAZÃO DE REFRIGERANTE EM FUNÇÃO DO SEU VALOR ESTIMADO.	113
FIGURA 68 – DISTRIBUIÇÃO DE FREQUÊNCIAS DO RESÍDUO OBTIDO PARA O MODELO AJUSTADO PARA A VAZÃO DE REFRIGERANTE.	114
FIGURA 69 – VALORES NORMALIZADOS DO RESÍDUO OBTIDO PELO MODELO AJUSTADO PARA A VAZÃO DE REFRIGERANTE.	114
FIGURA 70 – SUPERFÍCIE DE RESPOSTA LEVANTADA PARA A VAZÃO DE REFRIGERANTE OBTIDA PARA O COMPRIMENTO DO CAPILAR EM SEU NÍVEL INTERMEDIÁRIO.	115
FIGURA 71 – CURVA DE NÍVEL LEVANTADA PARA A VAZÃO DE REFRIGERANTE CONSIDERANDO O COMPRIMENTO DO CAPILAR EM SEU NÍVEL INTERMEDIÁRIO.	115
FIGURA 72 - VALOR DE VARIÂNCIAS EM FUNÇÃO DAS RESPECTIVAS FONTES DE VARIABILIDADE COM RELAÇÃO À TEMPERATURA DE EVAPORAÇÃO.	117
FIGURA 73 - DISTRIBUIÇÃO DO RESÍDUO OBTIDO PELO MODELO AJUSTADO PARA A TEMPERATURA DE EVAPORAÇÃO EM FUNÇÃO DO SEU VALOR ESTIMADO.	118
FIGURA 74 - DISTRIBUIÇÃO DE FREQUÊNCIAS DO RESÍDUO DO MODELO AJUSTADO PARA A TEMPERATURA DE EVAPORAÇÃO.	119
FIGURA 75 – VALORES NORMALIZADOS DO RESÍDUO OBTIDO PELO POLINÔMIO AJUSTADO PARA A TEMPERATURA DE EVAPORAÇÃO.	119

FIGURA 76 – SUPERFÍCIE DE RESPOSTA LEVANTADA PARA A TEMPERATURA DE EVAPORAÇÃO PARA O COMPRIMENTO DO CAPILAR EM SEU NÍVEL INTERMEDIÁRIO.	120
FIGURA 77 – CURVA DE NÍVEL LEVANTADA PARA A TEMPERATURA DE EVAPORAÇÃO CONSIDERANDO O COMPRIMENTO DO CAPILAR EM SEU NÍVEL INTERMEDIÁRIO.	120
FIGURA 78 – VALOR DE VARIÂNCIAS EM FUNÇÃO DAS RESPECTIVAS FONTES DE VARIABILIDADE COM RELAÇÃO À TEMPERATURA DE CONDENSAÇÃO.	122
FIGURA 79 – DISTRIBUIÇÃO DO RESÍDUO OBTIDO PELO MODELO AJUSTADO PARA A TEMPERATURA DE CONDENSAÇÃO EM FUNÇÃO DO SEU VALOR ESTIMADO.	123
FIGURA 80 – DISTRIBUIÇÃO DE FREQUÊNCIAS DO RESÍDUO DO MODELO AJUSTADO PARA A TEMPERATURA DE CONDENSAÇÃO.	124
FIGURA 81 – VALORES NORMALIZADOS DO RESÍDUO OBTIDO PELO POLINÔMIO AJUSTADO PARA A TEMPERATURA DE CONDENSAÇÃO.	124
FIGURA 82 – SUPERFÍCIE DE RESPOSTA LEVANTADA PARA A TEMPERATURA DE CONDENSAÇÃO CONSIDERANDO O COMPRIMENTO DO CAPILAR EM SEU NÍVEL INTERMEDIÁRIO.	125
FIGURA 83 – CURVA DE NÍVEL LEVANTADA PARA A TEMPERATURA DE CONDENSAÇÃO CONSIDERANDO O COMPRIMENTO DO CAPILAR EM SEU NÍVEL INTERMEDIÁRIO.	125
FIGURA 84 – VARIABILIDADE DO RESÍDUO OBTIDO PARA A CAPACIDADE FRIGORÍFICA EM FUNÇÃO DO NÍVEL DO TERMO $x_1.x_3$	133
FIGURA 85 – VARIABILIDADE DO RESÍDUO OBTIDO PARA O COEFICIENTE DE EFICÁCIA EM FUNÇÃO DO NÍVEL DO TERMO x_1	133
FIGURA 86 – VARIABILIDADE DO RESÍDUO OBTIDO PARA O SUPER AQUECIMENTO EM FUNÇÃO DO NÍVEL DO TERMO $x_1.x_3$	134
FIGURA 87 – VARIABILIDADE DO RESÍDUO OBTIDO PARA A TEMPERATURA DE DESCARGA EM FUNÇÃO DO NÍVEL DO TERMO $x_2.x_3$	134
FIGURA 88 – DIAGRAMA PRESSÃO X ENTALPIA DEMONSTRANDO A RELAÇÃO ENTRE O SUPER AQUECIMENTO E A TEMPERATURA DE DESCARGA.	142
FIGURA 89 – DIAGRAMA PRESSÃO X ENTALPIA DEMONSTRANDO A RELAÇÃO ENTRE A TEMPERATURA DE DESCARGA E A TEMPERATURA DE EVAPORAÇÃO.	142
FIGURA 90 – CURVA DE NÍVEL REPRESENTANDO A REGIÃO DE MÁXIMA CAPACIDADE FRIGORÍFICA.	143
FIGURA 91 – CURVA DE NÍVEL REPRESENTANDO A INTERSEÇÃO ENTRE A ÁREA DE MÁXIMA CAPACIDADE FRIGORÍFICA E A REGIÃO DE MELHOR COEFICIENTE DE EFICÁCIA.	143
FIGURA 92 – CURVA DE NÍVEL REPRESENTANDO A INTERSEÇÃO ENTRE A ÁREA DE MÁXIMA CAPACIDADE FRIGORÍFICA E AS REGIÕES DE MELHOR COEFICIENTE DE EFICÁCIA E SUPER AQUECIMENTO.	144
FIGURA 93 – CURVA DE NÍVEL REPRESENTANDO A INTERSEÇÃO ENTRE A ÁREA DE MÁXIMA CAPACIDADE FRIGORÍFICA E AS ÁREAS DE MELHOR COEFICIENTE DE EFICÁCIA, SUPER AQUECIMENTO E TEMPERATURA DE DESCARGA.	144
FIGURA 94 – RESÍDUO DA EQUAÇÃO DE CALIBRAÇÃO PARA O SENSOR DE TEMPERATURA 01.	150
FIGURA 95 – RESÍDUO DA EQUAÇÃO DE CALIBRAÇÃO PARA O SENSOR DE TEMPERATURA 02.	151
FIGURA 96 – RESÍDUO DA EQUAÇÃO DE CALIBRAÇÃO PARA O SENSOR DE TEMPERATURA 03.	152
FIGURA 97 – RESÍDUO DA EQUAÇÃO DE CALIBRAÇÃO PARA O SENSOR DE TEMPERATURA 04.	153
FIGURA 98 – RESÍDUO DA EQUAÇÃO DE CALIBRAÇÃO PARA O SENSOR DE BAIXA PRESSÃO.	154
FIGURA 99 – RESÍDUO DA EQUAÇÃO DE CALIBRAÇÃO PARA O SENSOR DE ALTA PRESSÃO.	155

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – QUADRO DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA PARA UMA QUANTIDADE GENÉRICA DE NÍVEIS E RÉPLICAS.	32
TABELA 2 – QUANTIDADES DE NÍVEIS E RÉPLICAS.	32
TABELA 3 - NÍVEIS DAS VARIÁVEIS INDEPENDENTES DA FASE 1.	49
TABELA 4 - RESULTADOS EXPERIMENTAIS DA FASE 1.	49
TABELA 5 - NÍVEIS DAS VARIÁVEIS INDEPENDENTES DA FASE 2.	50
TABELA 6 - RESULTADOS EXPERIMENTAIS DA FASE 2.	50
TABELA 7 - NÍVEIS DAS VARIÁVEIS INDEPENDENTES DA FASE 3.	51
TABELA 8 - RESULTADOS EXPERIMENTAIS DA FASE 3.	51
TABELA 9 - RESULTADOS EXPERIMENTAIS. RÉPLICA DA FASE 3.	52
TABELA 10 - RESULTADOS OBTIDOS NA FASE 1.	54
TABELA 11 - ANÁLISE DE VARIÂNCIA DOS RESULTADOS OBTIDOS NO PLANEJAMENTO DA FASE 1.	55
TABELA 12 – VALORES DOS NÍVEIS ADOTADOS (CODIFICADOS E NATURAIS) E RESULTADOS DA VARIÁVEL RESPOSTA (CAPACIDADE FRIGORÍFICA) PARA OS ENSAIOS DA FASE 2.	60
TABELA 13 – PLANEJAMENTO ELABORADO COM OS VALORES DAS OITO VARIÁVEIS RESPOSTA.	64
TABELA 14 – ANÁLISE DE VARIÂNCIA DOS RESULTADOS OBTIDOS PARA CAPACIDADE FRIGORÍFICA NA FASE 3.	66
TABELA 15 – ANÁLISE DE VARIÂNCIA DO AJUSTE FEITO COM O MODELO COMPLETO.	68
TABELA 16 - ANÁLISE DE VARIÂNCIA DO AJUSTE FEITO COM O MODELO SIMPLIFICADO.	69
TABELA 17 – COORDENADAS DO PONTO ESTACIONÁRIO OBTIDAS PARA A CAPACIDADE FRIGORÍFICA EM FUNÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO.	71
TABELA 18 – AUTO VALORES E SEUS RESPECTIVOS AUTO VETORES RELATIVOS À MATRIZ B.	72
TABELA 19 – VALORES OBTIDOS AO CAMINHARMOS AO LONGO DO EIXO W1.	76
TABELA 20 - VALORES OBTIDOS AO CAMINHARMOS AO LONGO DO EIXO W2.	77
TABELA 21 - VALORES OBTIDOS AO CAMINHARMOS AO LONGO DO EIXO W3.	77
TABELA 22 – ANÁLISE DE VARIÂNCIA DOS RESULTADOS OBTIDOS PARA O COEFICIENTE DE EFICÁCIA.	82
TABELA 23 – ANÁLISE DE VARIÂNCIA DO MODELO AJUSTADO PARA O COEFICIENTE DE EFICÁCIA.	84
TABELA 24 – ANÁLISE DE VARIÂNCIA FEITA COM O OS DADOS OBTIDOS PARA O SUPER AQUECIMENTO.	89
TABELA 25 – ANÁLISE DE VARIÂNCIA DO MODELO AJUSTADO PARA O SUPER AQUECIMENTO.	91
TABELA 26 – ANÁLISE DE VARIÂNCIA FEITA COM O OS DADOS OBTIDOS PARA A TEMPERATURA DE DESCARGA.	95
TABELA 27 – ANÁLISE DE VARIÂNCIA DO MODELO AJUSTADO PARA A TEMPERATURA DE DESCARGA.	97
TABELA 28 - ANÁLISE DE VARIÂNCIA FEITA COM O OS DADOS OBTIDOS PARA O SUB RESFRIAMENTO.	101
TABELA 29 - ANÁLISE DE VARIÂNCIA DO MODELO CÚBICO AJUSTADO PARA O SUB RESFRIAMENTO.	103
TABELA 30 – ANÁLISE DE VARIÂNCIA DOS RESULTADOS OBTIDOS PARA CAPACIDADE FRIGORÍFICA NA FASE 3.	111
TABELA 31 - ANÁLISE DE VARIÂNCIA DO MODELO AJUSTADO PARA A VAZÃO DE REFRIGERANTE.	113
TABELA 32 - ANÁLISE DE VARIÂNCIA FEITA COM O OS DADOS OBTIDOS PARA A TEMPERATURA DE EVAPORAÇÃO.	116
TABELA 33 – ANÁLISE DE VARIÂNCIA DO MODELO AJUSTADO PARA A TEMPERATURA DE EVAPORAÇÃO.	118

TABELA 34 - ANÁLISE DE VARIÂNCIA FEITA COM OS DADOS OBTIDOS PARA A TEMPERATURA DE CONDENSAÇÃO.	121
TABELA 35 - ANÁLISE DE VARIÂNCIA DO MODELO AJUSTADO PARA A TEMPERATURA DE CONDENSAÇÃO.	123
TABELA 36 - TERMOS MAIS SIGNIFICATIVOS PARA A VARIABILIDADE DE CADA VARIÁVEL RESPOSTA.	126
TABELA 37 - RESUMO DOS RESULTADOS OBTIDOS PARA OS AJUSTES FEITOS PARA CADA VARIÁVEL RESPOSTA.	128
TABELA 38 - VALORES DO RESÍDUO DAS VARIÁVEIS RESPOSTA EM FUNÇÃO DOS NÍVEIS DE TODOS OS TERMOS DAS VARIÁVEIS INDEPENDENTES.	131
TABELA 39 - ANÁLISE DA VARIÂNCIA DO RESÍDUO EM FUNÇÃO DOS NÍVEIS DOS TERMOS INDEPENDENTES.	132
TABELA 40 - PRESSÕES CRÍTICAS DETERMINADAS PARA OS EXPERIMENTOS DA FASE 3.	141
TABELA 41 - DADOS LEVANTADOS PARA A CALIBRAÇÃO DOS SENSORES.	149

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

C	Comprimento do Tubo Capilar	m
CoEf	Coeficiente de Eficácia	
D	Diâmetro interno do Tubo Capilar	mm
F	F de Snedecor	
F.V.	Fonte de Variabilidade	
G	Carga Refrigerante	g
G.L.	Graus de Liberdade	
P	Probabilidade	
Pevap	Pressão de Evaporação	kPa
Pcond	Pressão de Condensação	kPa
Pot	Potência Consumida pelo Compressor	W
Qe	Capacidade Frigorífica	W
Q.M.	Quadrado Médio	
R ²	Coeficiente de Correlação = (Variabilidade do Modelo)/(Variabilidade Total)	
Saq	Super Aquecimento	°C
S.Q.	Soma de Quadrados	
Sub	Sub Resfriamento	°C
Tamb	Temperatura Ambiente	°C
Tcond	Temperatura de Condensação	°C
Tdes	Temperatura de Descarga	°C
Tevap	Temperatura de Evaporação	
Tsuc	Temperatura do refrigerante na linha de sucção	°C
Tsub	Temperatura do refrigerante na linha de líquido	°C
Vaz	Vazão de Refrigerante	g / s

LISTA DE SÍMBOLOS

h	Entalpia específica	J/kg
i	Índice auxiliar	
n	Quantidade	
n_C	Número de respostas obtidas no planejamento Fatorial desconsiderando o ponto central	
n_F	Número de respostas obtidas no ponto central	
s	Desvio Padrão	
x	Variável Independente	
x'	Vetor transposto das variáveis independentes	
y	Variável resposta	
$\hat{y}$	Valor ajustado da Variável Resposta	
$\bar{y}$	Valor Médio da Variável Resposta	
$\bar{y}_C$	Média das respostas obtidas no ponto central	
$\bar{y}_F$	Média das respostas obtidas pelo Planejamento Fatorial fora do ponto central	
w	Variável na forma canônica	
$\varnothing$	Diâmetro interno do capilar	mm
λ	Auto Valor	
β	Coeficiente do polinômios ajustado	

Subscritos

<i>1</i>	Variável 1
<i>2</i>	Variável 2
<i>3</i>	Variável 3
<i>e</i>	Entrada
<i>s</i>	Saída
<i>i</i>	Índice auxiliar

RESUMO

OLIVEIRA, S. J. (2001). *Otimização e Análise do Desempenho de Sistemas Frigoríficos utilizando o Método de Superfície de Resposta, o Planejamento de Experimentos e Ensaio de Protótipos*. São Carlos, 2001. 180p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

Os Métodos de Superfície de Resposta e Planejamento de Experimentos foram utilizados no processo de análise e otimização de Sistemas Frigoríficos. Foram determinadas as dimensões do tubo capilar juntamente com a carga de refrigerante que proporcionaram as melhores condições de funcionamento a um protótipo. O comportamento de oito variáveis resposta foram estudadas, que são: Capacidade Frigorífica, Coeficiente de Eficácia, Temperatura de Descarga, Super Aquecimento, Sub Resfriamento, Vazão de Refrigerante, Temperatura de Evaporação e Temperatura de Condensação. Superfícies de Resposta e Curvas de Nível foram levantadas em diversas situações de interesse, visando revelar o comportamento e a sensibilidade do sistema. Alguns fatores revelaram níveis que propiciaram uma reduzida variabilidade para certas variáveis resposta demonstrando o conceito de sistema robusto. O método mostrou-se bastante adequado, contribuindo com resultados de grande valia para a otimização e análise do comportamento de sistemas frigoríficos, além de poder ter sua aplicabilidade ampliada para sistemas térmicos em geral.

Palavras-chave: refrigeração, planejamento de experimentos, superfície de resposta, otimização, análise de variância, métodos estatísticos, projeto, tubo capilar.

ABSTRACT

OLIVEIRA, S. J. (2001). *Optimization and Analysis of the Performance of Refrigeration Systems using Response Surface Methodology, Experimental Design and Prototype Experiments*. São Carlos, 2001. 180p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

The Response Surface Methodology and the Design of Experiments were applied on the analysis and optimization process of refrigeration systems. The dimensions of a capillary tube and refrigerant charge that provided the best working conditions to a prototype were determined. The behavior of the Refrigeration Capacity, Coefficient of Performance, Discharge Temperature, Super Heating, Sub Cooling, Mass Flow Rate, Evaporation Temperature and Condensing Temperature were studied in detail. Surface Response and Contour plots were constructed on many situations in order to reveal the system behavior and sensitivity. Some factor levels provided a small variability to certain responses, demonstrating the concept of robust system. The methodology contributed properly with valuable results to the optimization and analysis of refrigeration system behavior; besides, its applicability can be easily generalised to thermal systems.

Keywords: refrigeration, design of experiments, response surface, optimization, analysis of variance, statistical methods, design, capillary tube.

1 - INTRODUÇÃO

O mundo atual tem enfrentado o grande dilema da informação. Nunca houve, na história da humanidade, tanta disponibilidade de informação quanto atualmente. Meios de comunicação como a televisão por assinatura ampliaram significativamente o número de canais disponíveis permitindo não apenas uma maior quantidade de informação, mas também uma internacionalização da mesma. Fatos que ocorrem num determinado local são agilmente transmitidos, até mesmo ao vivo, para todo o planeta como pudemos presenciar nas Olimpíadas de Sydney.

A mídia impressa também tem se atualizado publicando jornais locais que cobrem os acontecimentos ocorridos o mais próximo possível do leitor. Esta tendência criou os chamados jornais regionais, o que se repete também no âmbito da televisão. Revistas são cada vez mais especializadas abordando temas específicos na busca de mercados extremamente segmentados.

No que tange a novos meios de comunicação torna-se impossível contestar o turbilhão causado pela Rede Mundial de Computadores (Internet). A rotina de praticamente todas as atividades onde exista a troca de informações foi alterada por este novo advento do mundo atual, desde uma simples consulta do saldo bancário até uma grande transação financeira. Milhares de páginas com os mais diversos tipos de informação são disponibilizadas a cada dia na Internet, oferecendo uma quantidade de dados jamais imaginada anteriormente.

A humanidade passou por momentos em que a informação foi um privilégio de minorias, entretanto atualmente a situação é substancialmente inversa. Vivemos em meio a uma verdadeira avalanche de dados de modo que o grande dilema está em como retirar deste imenso universo apenas aquilo que seja de interesse.

Todo o sucesso proporcionado pelos atuais meios de comunicação tem gerado uma tendência natural em se relegar seus aspectos negativos. Entretanto, a Revista Business Week (30 de agosto de 1999), em seu editorial, ressalta que uma comunicação contínua pode incrementar a integração ou então causar alienação. Outro aspecto crucial, levantado pela Revista Business Week em seu editorial de 4 de outubro de 1999, é o problema da credibilidade da informação.

Os usuários desejam objetividade, eficiência e principalmente credibilidade nas informações no intuito de utilizá-las em seus processos de tomada de decisão. A busca pela informação com tais qualidades é constatada na obsessão dos usuários pelos rótulos consagrados (empresas consideradas fidedignas), refletindo o desejo por credibilidade e legitimidade. Fica claro que apesar das facilidades da era atual ainda há a necessidade de um mecanismo consolidado que forneça a informação com todos os requisitos desejados pelo usuário.

Paralelamente, no âmbito da engenharia, temos uma situação, sob alguns aspectos, análoga. O conhecimento, neste segmento, é desenvolvido primordialmente com base na observação. Um processo iterativo entre uma hipótese levantada e sua respectiva comprovação experimental é a base do avanço do conhecimento. Havendo discrepância entre teoria e observação, as hipóteses devem ser reformuladas e, nova avaliação experimental conduzida na busca de uma concordância.

Os erros experimentais, por sua vez, acabam por determinar até que ponto vai esta concordância ao estabelecer uma faixa de erro, dentro da qual não há como auferir conclusões. Conforme KEMPTHORNE (1973), a verificação de uma teoria nunca é absoluta, pode-se apenas verificar a compatibilidade entre teoria e observação dentro dos limites de erro inerentes à observação. Uma conclusão pode então ser alcançada somente quando o erro envolvido for pequeno o suficiente para não compromete-la, de modo que somente quando este erro for quantificado e mantido em níveis razoáveis de aceitação é que a conclusão poderá se transformar em um novo conhecimento.

Há, portanto, a necessidade de que o método de tratamento da informação tenha um caráter analítico e conclusivo dos dados ora levantados. É importante atentar para o fato de que a conclusão, como produto final deste processo,

depende intimamente da metodologia empregada no levantamento e análise da informação. Apesar da conclusão ser indubitavelmente o aspecto mais importante, deve-se atentar também para a eficiência do método. Em outras palavras, a quantidade de informações que necessita ser levantada para a obtenção de uma conclusão satisfatória, configura-se como uma eficiência que leva em conta os recursos e tempo a serem empregados no estudo em questão. Tais aspectos configuram fatores práticos cuja administração é sumariamente importante para um efetivo sucesso. Mantidas as devidas proporções, o problema no caso da engenharia é menos dramático que no caso da comunicação, descrito inicialmente. O conhecimento aqui necessário para o tratamento da informação já existe, e constitui-se numa Ciência plenamente desenvolvida nos dias atuais, trata-se da Estatística. No início do século, em torno dos anos 20, Sir Ronald A. Fisher foi o grande pioneiro inovando o uso de métodos estatísticos em aplicações na produção agrícola na Inglaterra. Trabalhando inicialmente numa estação experimental e posteriormente na universidade, ele foi o primeiro a desenvolver a Análise de Variância como Método Estatístico em Planejamento de Experimentos. Áreas como a biologia e agricultura receberam as primeiras aplicações, e em decorrência, muito da terminologia empregada advém destes setores.

Na década de 30 iniciaram-se as aplicações de Planejamento de Experimentos na indústria, mais especificamente no setor têxtil e de fiação. Outros segmentos como a indústria química e a eletrônica de semicondutores foram alvo de aplicações da técnica, revelando considerável sucesso. Atualmente uma crescente atenção tem sido dada, por diversos setores industriais Norte Americanos, para o uso desta metodologia por ela ter sido de fundamental importância no sucesso alcançado por seus principais competidores. O conhecimento e aplicação do Planejamento de Experimentos de forma integrada à Engenharia tem demonstrado ser uma extraordinária ferramenta para o futuro da indústria atual.

Considerando um sistema (processo ou projeto) onde a atuação de variáveis independentes provoquem alterações numa ou em várias variáveis resposta, temos alguns objetivos que a metodologia proporciona como resultados de grande interesse:

- 1 – Determinação do grau de influência das variáveis independentes na variável resposta em estudo.
- 2 – Determinação da melhor combinação de níveis para as variáveis independentes de modo que a variável resposta permaneça em determinada faixa desejada.
- 3 – Determinação da melhor combinação de níveis para as variáveis independentes que acarretam a menor variabilidade na variável resposta.
- 4 – Determinação da melhor combinação de níveis para as variáveis independentes de modo que as variáveis não controladas tenham seus efeitos minimizados sobre a variável resposta.
- 5 – Determinação do erro experimental.
- 6 – Determinação dos efeitos de interação entre variáveis, ou seja, quando o efeito causado por uma variável, na variável resposta, depende do nível de outra ou outras variáveis.
- 7 – Aplicação à variáveis qualitativas e quantitativas.
- 8 – Permite que conclusões possam ser tiradas no recorrer do levantamento dos resultados experimentais, possibilitando que com apenas uma fração da quantidade total de experimentos resultados possam ser obtidos.

Abordando o setor da Engenharia Mecânica voltada para a área de Ciências Térmicas nos deparamos com um surpreendente desuso de Ferramentas Estatísticas. TAYLOR et al (1999) compartilha esta idéia em seu artigo, onde relata a deficiência do uso de Métodos Estatísticos na análise e projeto de sistemas térmicos. Relaciona ainda as seguintes razões para o fato: a falta de informações estatísticas em muitos dos componentes de sistemas térmicos, a falta de procedimentos bem definidos e universalmente aceitos que incluam Métodos Estatísticos e probabilísticos na análise e projeto de sistemas térmicos e, finalmente, a mais importante delas que trata-se de uma tradicional falta de ênfase no ensino de Estatística e Probabilidade (conhecimento fundamental para o uso e aplicação de Métodos Estatísticos) para engenheiros especializados em ciências térmicas.

Ressaltando a atividade de projeto de sistemas frigoríficos, propriamente dita, verificamos por experiência própria, que os procedimentos adotados para o seu desenvolvimento são apoiados nas informações de desempenho dos diversos componentes divulgada pelos fabricantes. Parâmetros importantes,

como Temperatura de Condensação, Temperatura de Evaporação e Capacidade Frigorífica, são utilizados como referência na divulgação destes dados. O ponto crucial passa a ser a escolha da combinação mais adequada entre os componentes para que o conjunto desenvolva as funções desejadas adequadamente. O caminho mais comum, conforme ressalta STOECKER (1985), não raramente é o da tentativa e erro, associada à experiência do projetista na área de aplicação do equipamento. Uma evolução deste procedimento, com um razoável grau de sofisticação envolvido, é a simulação do sistema a ser projetado. Esta técnica procura reproduzir o comportamento do equipamento a partir de equações matemáticas fundamentadas nas leis da Física, ou equações empíricas baseadas na observação. A abordagem pode ser feita em regime permanente, como a desenvolvida por OLIVEIRA (1996), ou em regime transiente como a trabalhada por DHAR (1978). Esta forma de tratar o problema é sem dúvida um avanço para a atividade de projeto, que aliada a atual popularidade dos computadores tem se difundido muito. Apesar disso a escolha dos componentes continua tendo que ser feita, para que o conjunto seja avaliado pela simulação. Neste ponto um outro desenvolvimento se fez necessário para orientar a escolha dos componentes segundo uma filosofia de projeto. A otimização encaixa-se neste contexto revelando a combinação de componentes que otimiza o funcionamento do conjunto. Portanto, ao determinarmos extrair o máximo de Capacidade Frigorífica de um determinado compressor é fundamental o dimensionamento dos demais componentes como o condensador, evaporador e especialmente o elemento de expansão.

Neste ponto constatamos que o dimensionamento do tubo capilar como elemento de expansão ainda se revela um desafio para os atuais procedimentos de projetos. O estudo deste componente de forma isolada tem sido intenso, mas o seu comportamento quando inserido no conjunto de um equipamento frigorífico recebe abordagens apenas qualitativas. A inestimável contribuição da ASHRAE Equipment (1979) reúne diversos ábacos que permitem determinar a vazão de refrigerante através de um capilar num escoamento bloqueado ou não. O volume do condensador é considerado importante, assim como a carga de refrigerante que deve assumir tolerâncias estreitas. O texto também introduz um conceito de balanço de capacidade e ressalta a importância de um desenvolvimento experimental no processo de

dimensionamento. Entretanto, os efeitos causados pelo capilar sobre o sistema e seus componentes, são tratados de forma qualitativa, a qual colabora para o entendimento do fenômeno, mas não é suficiente quando se trata de um dimensionamento visando uma condição de ótimo. E sem dúvida este ponto é de grande interesse para o setor industrial, que pressionado por um mercado competitivo deseja usufruir da redução de custo e melhora de desempenho que um equipamento otimizado traria.

2 - OBJETIVO

O projeto de sistemas frigoríficos é realizado, via de regra, pela seleção dos seus diversos equipamentos e dispositivos, a partir de dados técnicos fornecidos pelos fabricantes. A principal informação contida nos catálogos é a Capacidade Frigorífica associada ao componente (compressor, condensador, evaporador e dispositivo de expansão) em função da Temperatura de Evaporação e Condensação, levantada em uma bancada calorimétrica específica. O sistema frigorífico mais simples é composto de quatro partes com funções distintas, interligadas por tubulações de cobre, onde escoam um fluido operante, escolhido conforme a aplicação. A otimização do desempenho do sistema depende fundamentalmente da interação entre os diversos componentes, da quantidade de carga do fluido operante e do ajuste do dispositivo causador da expansão do fluido no evaporador. Portanto, o desempenho final do sistema frigorífico depende muito da habilidade técnica do montador.

Este trabalho tem como objetivo principal desenvolver uma metodologia de otimização do desempenho de sistemas frigoríficos utilizando o Método de Superfície de Resposta, o Planejamento de Experimentos e o ensaio de protótipos. A metodologia em questão pode ser aplicada de forma mais ampla em qualquer sistema térmico como ferramenta de desenvolvimento e análise de produtos.

O protótipo do sistema frigorífico montado usa como dispositivo de expansão um tubo capilar por oferecer um desafio importante com relação à definição do seu comprimento e diâmetro. Portanto, a otimização do sistema é caracterizada basicamente pela definição da quantidade de Carga do fluido operante, do Diâmetro Interno e Comprimento do Tubo Capilar que proporcionem a máxima Potência Frigorífica com o melhor Coeficiente de Eficácia. O levantamento da

sensibilidade dos fatores mencionados frente ao sistema também é meta deste trabalho.

Além do desempenho, o método também deve de preocupar com a vida útil do sistema buscando condições que preservem seu compressor. Para isso o equipamento deverá trabalhar dentro de certos limites para a Temperatura de Descarga e o Super Aquecimento que não danifiquem o compressor prematuramente.

3 ATUAL ESTADO DA ARTE

O trabalho publicado por TAYLOR et al (1999) chama atenção para um fato que até então não havia sido percebido com a devida clareza. Neste artigo os autores fazem afirmações importantes sobre uma latente ausência de trabalhos relativos à análise e projeto de sistemas térmicos fazendo uso de ferramentas estatísticas. Um resumo teórico referente à Análise de Incerteza é feito e em seguida três estudos de caso aplicados a projeto e análise de sistemas térmicos são apresentados. Os três exemplos fazem uso da Análise de Incerteza feita para avaliar a sensibilidade do sistema com relação às variáveis envolvidas e também para analisar seu ponto de funcionamento numa condição de regime permanente. Considerar as variáveis como valores providos de uma dispersão fez com que o ponto de funcionamento passasse a ser um intervalo. Com isso erros de projeto, que eventualmente ocorreriam, caso a abordagem fosse essencialmente determinística, podem ser evitados. O estudo de sensibilidade feito, revelou o grau de influência que cada uma das variáveis exerce sobre os sistemas, que foram: um circuito hidráulico para transferência de óleo entre dois reservatórios, uma rede hidráulica para circulação de um fluido de resfriamento e por fim um trocador de calor. Expressões para o cálculo de perda de carga, transferência de calor e conservação de massa foram utilizadas na determinação das fontes de incerteza através do princípio da propagação dos erros.

JAMES et al (1995) publicou um artigo com uma linha muito semelhante ao anterior, no qual foi desenvolvida uma aplicação utilizando a Análise de Incerteza no dimensionamento de um trocador de calor. Aqui também foi ressaltada a deficiência no emprego de ferramentas estatísticas na área Térmica da Engenharia.

Pela atualidade dos artigos acima, verificamos indícios deste ser um tema ainda pouco explorado. Realizando uma pesquisa na literatura correlata

constatamos resultados interessantes no que se refere ao uso de determinadas Ferramentas Estatísticas dentro do universo da Engenharia. Abordamos do geral ao específico chegando até o nível da área Térmica da Engenharia Mecânica, a qual é de nosso interesse. Na parte Estatística, selecionamos algumas ferramentas de interesse ressaltando o grau de utilização de cada uma delas frente as áreas e sub áreas da Engenharia. Colocando os resultados na forma de gráficos, podemos verificar na FIGURA 1 os artigos publicados na área de Engenharia classificados a partir das 4 ferramentas estatísticas, onde a Análise de Variância obteve a maior quantidade de publicações. A FIGURA 2 traz o mesmo tipo de gráfico enfocando agora o setor de Engenharia Mecânica, onde verificamos um perfil um pouco modificado em relação ao anterior. Constatamos aqui que a Análise de Variância obteve a maior quantidade de publicações, a qual vai se reduzindo conforme caminhamos para as ferramentas da direita. Tendo em vista suas características, sabemos que o método de Superfície de Resposta, ao ser empregado, exige normalmente o uso do Planejamento Fatorial, e este por sua vez a Análise de Variância. Entretanto, a ordem inversa não ocorre, ou seja, o emprego da Análise de Variância não demanda o uso do Planejamento Fatorial, que por sua vez não exige a utilização da Superfície de Resposta. Desta forma as quantidades que verificamos na FIGURA 1, para estas três ferramentas é algo normalmente esperado, assim como na FIGURA 2. Constatamos que a Análise de Incerteza é bastante empregada na Engenharia Mecânica, demonstrando a popularidade do método. Observando os resultados obtidos na área Térmica da Engenharia Mecânica, através da FIGURA 3, constatamos um uso ainda mais acentuado da Análise de Incerteza em relação às demais. Nesta área específica verificamos que o perfil de utilização das ferramentas difere dos obtidos nos âmbitos mais genéricos, demonstrando haver posturas divergentes de atuação, quanto ao uso destes métodos, de setor para setor. Fazendo uma classificação dos trabalhos baseada no ano de publicação, verificamos uma tendência crescente no uso das ferramentas estatísticas, conforme pode ser visto na FIGURA 4. Observando o gráfico nota-se uma aparente redução das publicações no ano de 1999 para 2000. Esta é na verdade uma confirmação da tendência de crescimento, pois o levantamento incluiu apenas o primeiro semestre de 2000. Seguindo a tendência linearmente, pode-se prever que o número de publicações chegue pelo menos ao dobro do valor indicado. A julgar pelo

uso predominante da Análise de Incerteza, podemos supor que o crescente aumento do seu uso demonstra uma preocupação cada vez maior na determinação do erro nos resultados.

FIGURA 1 – Artigos classificados por Ferramenta Estatística na área de Engenharia.

FIGURA 2 – Artigos classificados por Ferramenta Estatística na área de Engenharia Mecânica.

FIGURA 3 - Artigos classificados por Ferramenta Estatística na área Térmica da Engenharia Mecânica.

FIGURA 4 – Artigos classificados por ano de publicação e Ferramenta Estatística usada.

Após esta verificação consideramos interessante ressaltar o que este ramo da Matemática pode proporcionar ao desenvolvimento de Engenharia. Conforme o artigo de HANN & HOERL (1998), os estatísticos tem diversos desafios a enfrentar no setor de negócios e também na indústria. A grande utilização da

Estatística nos meios de produção gerou resultados de grande sucesso nas indústrias, como o Seis Sigma originalmente aplicado na Motorola e posteriormente na GE. Entretanto, estes casos deram uma falsa idéia de que a Estatística não pode ser aplicada em outros segmentos. Na área de desenvolvimento de produtos os autores ressaltam que a qualidade final, normalmente atribuída aos meios de produção, é na pratica determinada durante o desenvolvimento antes da fabricação. Portanto a maior oportunidade em se conseguir um produto com altos índices de qualidade se encontra na fase de desenvolvimento. Esta pode ser considerada uma mensagem dos grandes conhecedores da área de qualidade como Taguchi e Deming, ressaltando que a maior parte da variabilidade é atribuída à própria concepção do sistema. Portanto, alguns dos desafios residem na adequação de ferramentas estatísticas para uso em projeto.

O desenvolvimento de um produto deve sem dúvida buscar seu melhor desempenho, entretanto outro fator de grande importância é a sua confiabilidade. Este é um terreno bastante fértil para a Estatística, especialmente quando se aborda o tema a partir de uma técnica conhecida como Testes Acelerados. O clássico livro escrito por NELSON (1990) é uma ótima referência que detalha muito bem o assunto. Como um determinado produto pode ter uma vida normal de alguns anos sem falha, fica inviável esperar este tempo para obter dados a respeito. A técnica consiste em submeter o equipamento a uma condição crítica de funcionamento. Para isso uma variável do sistema (pressão, temperatura tensão, corrente, etc), chamada fator de aceleração, é mantida num nível acima do considerado normal, estimulando assim uma falha precoce. Com este tempo de falha induzido estima-se o tempo para a ocorrência de uma falha numa condição normal de funcionamento. ESCOBAR & MEEKER (1995) enfocam este mesmo tema levando em conta dois ou mais fatores de aceleração que não apresentem efeito de interação entre si.

A inserção e manutenção de um produto no mercado atual, de forma bem sucedida, passa por diversas exigências, onde, entre elas, temos o desenvolvimento de um projeto inovador. ARDAYFIO (2000) ressalta que um projeto inovador atribui um efetivo caráter competitivo ao produto. Muito esforço é dispensado por parte de fabricantes e instituições de pesquisa na busca de produtos cujas inovações tornem-se diferenciais de mercado, e conseqüentemente conquistem

novos clientes. Observando a competição em nível global, uma pesquisa feita no Reino Unido revelou a necessidade de medidas como, divulgação de exemplos bem sucedidos desenvolvidos no Reino Unido que demonstrem a capacidade de desenvolvimento de projetos do próprio Reino Unido, levantamento da efetiva importância do potencial de impacto do projeto na competitividade da empresa, e finalmente a importância do trabalho conjunto com instituições de pesquisa para que haja uma massa crítica de conhecimento que possibilitará a administração mais eficiente dos projetos. Um estudo foi feito num universo de 220 produtos britânicos, novos e re-projetados, avaliando o enfoque da contribuição de um projeto inovador na competitividade do produto em diferentes mercados. As principais conclusões foram: (1) produtos cujos projetos proporcionaram avanços efetivos, e não apenas uma re-estilização ou redução de custo, obtiveram sucesso comercial, (2) produtos cujo avanço abordou um caráter multidimensional tendo em vista o desempenho, funções e inovações técnicas conseguiram sucesso comercial, e (3) produtos onde o projeto envolveu apenas uma nova estilização preocupando-se mais com redução de custo do que com performance, fracassaram comercialmente. O artigo ainda aborda a importância de inovações de projeto em diversos segmentos de mercado dando uma especial atenção para o setor automobilístico. Em termos de pesquisa em relação a projetos inovadores o autor ressalta o fundamental papel do engenheiro como agente catalisador do processo. A atualização deste profissional torna-se também de extrema importância, e neste sentido alguns cursos como Projeto de Produtos e Processos, Projeto e Inovação, Engenharia de Projeto de Produtos são recomendados.

A palavra Projeto tem seu significado ligado ao ato de gerar novas estruturas. Tem uma conotação inventiva, ou seja, construir algo que ainda não existe estabelecendo como as coisas devem ser. Por outro lado o significado da palavra Ciência é identificar os elementos de uma estrutura existente. As Ciências Naturais procuram explicar os fenômenos da natureza verificando como as coisas são. O artigo de CROSS (1993) relaciona estas e outras definições, bem como faz uma revisão da evolução do termo Metodologia de Projeto desde a sua ascensão até o momento atual. O autor cita ainda os avanços da metodologia de Projetos ocorridos na última década, e entre eles o Desenvolvimento de Métodos de Projeto como os de Taguchi que é fundamentalmente apoiada em conhecimentos Estatísticos.

A Ferramenta Estatística mais incidente nos artigos levantados na área Térmica da Engenharia Mecânica foi a Análise de Incerteza, conforme já verificamos segundo a FIGURA 4. Entretanto, esta preocupação só ganhou impulso nos últimos cinco a seis anos. Apesar disso alguns autores já se preocupavam com o tema na década de oitenta, e até mesmo antes disso. Avisos da importância deste assunto foram uma constante por parte destes autores, onde podemos iniciar citando o artigo publicado por MOFFAT (1982). Na introdução relata que a Análise de Incerteza não é usada o quanto deveria no planejamento, desenvolvimento e interpretação dos dados experimentais levantados em Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos. Em seguida o autor apresenta alguns conceitos básicos como curva de distribuição Normal, curva de distribuição t de Student, erro sistemático e erro aleatório, precisão, incerteza e outros. Apresenta o princípio da propagação dos erros, a partir do qual obtém-se a incerteza de um parâmetro com base numa expressão matemática e nas incertezas associadas às variáveis envolvidas. Outro conceito importante introduzido é o da réplica, à qual são atribuídos níveis que vão permitindo a determinação das diversas fontes de incerteza. Em outra publicação MOFFAT (1985) ilustra os conhecimentos apresentados aplicando-os na determinação de um coeficiente convectivo de transferência de calor. Os valores são determinados assim como as respectivas incertezas, e na conclusão o autor sugere que o procedimento de Análise de Incerteza torne-se algo corriqueiro em procedimentos experimentais.

A importância do assunto estimulou a execução de um simpósio a respeito do tema retratado por KLINE (1985). Duas conclusões resultaram, a primeira afirma que a Análise de Incerteza é um ingrediente essencial no planejamento, controle e divulgação de experimentos, sendo de fundamental importância a sua execução, apesar do método empregado ainda ser motivo de discussão. A segunda conclusão enfatiza a importância da Análise de Incerteza no processo de planejamento do experimento.

A necessidade em se propor uma norma a respeito tornou-se concreta através da publicação de ABERNETHY (1985). Neste trabalho foi elaborado um projeto de norma para regulamentar os procedimentos na determinação

da incerteza dos resultados experimentais. Ao final é dada uma especial atenção para a incerteza envolvida na medição de escoamentos de fluidos.

LASSAHN (1985) elaborou um trabalho preocupado com a definição dos termos inerentes ao uso da Análise de Incerteza. Chama atenção para a importância do método e ressalta sua popularidade, mas comenta que a sua não aceitação pela comunidade científica ocorre por falta de definições que resulta numa consequente falta de significado para a incerteza.

O simpósio ocorrido em 1983, em Boston, sobre Análise de Incerteza, gerou diversos trabalhos a respeito do assunto. Entre eles, este publicado por KLINE (1985) onde é ressaltada a importância do tema tanto no campo da indústria como no acadêmico. Sendo que neste último a realidade é de um uso parcial do método demonstrando uma certa impopularidade. Dentre alguns conceitos apresentados destaco o do erro que é uma diferença entre valores, em contraste com a incerteza que assume características estatísticas. O artigo faz uma relação do que podemos obter através da Análise de Incerteza. Alguns destes resultados são:

- Estimula o exame do procedimento experimental revelando o potencial de possíveis fontes de erro.
- Aponta os procedimentos e / ou instrumentos que devem ser melhorados para que o resultado final assuma a incerteza desejada.
- Otimiza o custo da instrumentação para uma dada acuracidade resultante.
- Revela os procedimentos e ou instrumentos que são mais significativos para a acuracidade dos resultados.
- Informa antecipadamente, na fase de planejamento do experimento, se o procedimento vai satisfazer a acuracidade desejada para os resultados.

A medição do empuxo desenvolvido por turbinas de uso aeronáutico é o assunto desenvolvido por SMITH & WEHOFER (1985). Na introdução do seu artigo os autores citam a falta de ênfase dos engenheiros em questionar a validade dos resultados obtidos. O trabalho faz uma abordagem dos conceitos relacionados à Análise de Incerteza e em seguida descreve uma bancada de testes empregada em ensaios de turbinas. Comparações entre vários métodos para obtenção dos parâmetros de interesse são feitas e analisadas à luz da Análise de

Incerteza. No final os autores frisam que além da determinação do quão bom estão os resultados, há também uma preocupação com o custo envolvido no processo.

Baseado na mesma linha do artigo anterior, STEELE & COLEMAN (1987) publicaram um trabalho levantando inicialmente a importância para o uso da Análise de Incerteza. Em seguida é feita uma aplicação num problema envolvendo a determinação da concentração de partículas existentes no escoamento de exaustão do ar de um determinado processo. Orientado pelos resultados alcançados pela Análise de Incerteza, foram sendo feitas modificações no aparelho inicial até chegar-se na configuração mais adequada.

A Análise de Incerteza foi ganhando espaço a ponto de tornar-se tema do editorial escrito por ROOD & TELIONIS (1991) no periódico *Journal of Fluids Engineering*, onde é enfatizada a necessidade em se estabelecer regras consensuais para a aplicação da ferramenta. As diretrizes são relatadas e um exemplo em mecânica dos fluidos é desenvolvido.

Trabalhos recentes como: FANG et al (2000) a respeito do estudo do coeficiente de troca de calor de um cotovelo 180° imerso num escoamento de ar e submetido a diversos ângulos de inclinação, AL-FAHED et al (1999) em relação a comparação do coeficiente de troca de calor e perda de carga obtidos para escoamentos laminares em tubos micro aletados e tubos com insertos e CHAKROUN et al (1998) no estudo do aumento da transferência de calor causado por um jato de ar numa superfície rugosa, desenvolvem a Análise de Incerteza dos dados experimentais com base no trabalho de STEELE & COLEMAN (1989).

O trabalho de KLINE & McCLINTOCK (1953) ainda é usado como referencia na parte de Análise de Incerteza, em trabalhos recentemente publicados como os de YIN et al (2000) no estudo do escoamento em tubos dispostos horizontalmente e com seção transversal anular, WANG et al (1999) na investigação experimental do processo de fusão, YAN et al (1999) no estudo de coeficiente de troca de calor e perda da carga na condensação em um trocador de calor de placas com refrigerante R-134a, YAN & LIN (1998) no estudo do coeficiente de troca de calor e perda da carga na evaporação em tubos de pequeno diâmetro com refrigerante R-134a, LIOU & CHEN (1999) no levantamento do coeficiente de troca de calor num cotovelo 180° com seção retangular e em movimento de rotação, YAN & LIN

(1999) no estudo do coeficiente de troca de calor e perda da carga na condensação em tubos de pequeno diâmetro com refrigerante R-134a, WANG & ZHOU (1998) na determinação do comportamento transiente da camada limite em condições específicas e CHEN & WANG (1998) no estudo experimental de um escoamento submetido à convecção forçada em um canal com blocos aquecidos e posicionados em tandem.

O trabalho desenvolvido por MOFFAT (1988) é tomado como referência na parte de Análise de Incerteza por artigos recentes como TRAN et al (2000) na área de perda de carga em escoamentos bifásicos em pequenos canais, KWEON et al (2000) em ebulição nucleada e comportamento dinâmico de bolhas em banhos de refrigerantes saturados sob a ação de um campo elétrico, BEITELMAL et al (2000) no estudo do efeito causado ao coeficiente de troca de calor pela inclinação de um jato de ar sobre uma superfície plana, LAU et al (1999) na medição de campos de velocidade e temperatura em escoamentos turbulentos com geradores de vórtices e SPRINGER & THOLE (1998) no estudo de superfícies melhoradas para trocadores de calor compactos.

MELO et al (1999) desenvolve um trabalho experimental explorando o comportamento de diversos capilares mediante três tipos de refrigerantes. Um aparato experimental foi montado e os ensaios foram desenvolvidos sempre na condição de escoamento bloqueado para diversos capilares. Os efeitos individuais de cada variável foram levantados e uma correlação foi proposta para determinar a vazão de refrigerante. Um aspecto muito interessante verificado neste artigo é o da análise feita para resíduo resultante da correlação, pois esta é uma prática corriqueira na Estatística, entretanto não é muito frequente nesta área da Engenharia.

Enfocaremos agora o componente usado na função de elemento de expansão do equipamento estudado neste trabalho. O tubo capilar é um componente de uso muito popular entre sistemas frigoríficos de pequeno e médio porte. O trabalho publicado por SCHULZ (1985) traz uma extensa revisão de artigos a este respeito. Relata que desde os anos 20 já era conhecido o efeito de perda de pressão de um escoamento através de um tubo de pequeno diâmetro. A partir dos anos 40 com o aparecimento dos refrigerantes halogenados e dos compressores herméticos, o

uso de tubos capilares sofreu um grande impulso. Desde então muitos trabalhos de investigação a respeito do comportamento do escoamento através de tubos capilares para uso em refrigeração foram desenvolvidos. Problemas de projeto como o dimensionamento deste componente frente as demais partes do sistema passaram a ser motivo de atenção para diversos pesquisadores. Parâmetros como a relação comprimento-diâmetro, rugosidade superficial, tolerância do diâmetro, concentração de óleo no refrigerante e carga de refrigerante no sistema, passaram a ser motivo de estudo. A interdependência dos componentes básicos revelou-se de grande importância para o sistema assim como o dimensionamento de cada um deles. Características de desempenho também passam a ser verificadas mediante todas as variáveis citadas, inclusive em comparação ao uso de outras formas de expansão.

O tubo capilar tem como característica de funcionamento a equalização das pressões de um sistema frigorífico quando desligado, permitindo a migração do refrigerante da região de alta para a de baixa. WANG & WU (1990) fizeram uma comparação desta condição com um caso onde a equalização não ocorre, e verificaram uma redução de 4% na potência consumida pelo compressor.

Alguns projetistas se utilizam da diferença de temperatura entre o super aquecimento e a linha de líquido para promover uma transferência de calor. O líquido perde calor promovendo seu sub resfriamento, e o super aquecimento recebe calor que o super aquece ainda mais. Um capilar submetido a este tipo de montagem é chamado de não adiabático, e visa melhorar o desempenho do sistema, o qual nem sempre ocorre. DOMANSKI et al (1994) fazem um estudo deste problema determinando quando esta configuração de montagem é interessante ou não.

O trabalho feito por BANSAL & RUPASINGUE (1996) baseia-se no desenvolvimento de um modelo empírico para o dimensionamento de tubos capilares, adiabáticos e não adiabáticos, para pequenos sistemas de compressão a vapor. O comprimento do capilar é determinado a partir do seu diâmetro interno, sua rugosidade superficial, da vazão de refrigerante, da diferença de pressão a que ele é submetido e do sub resfriamento do refrigerante na sua entrada. Os resultados do modelo foram comparados com dados experimentais e uma concordância de $\pm 8\%$ foi observada.

O desenvolvimento de modelos matemáticos para descrever o comportamento de tubos capilares tem sido motivo de esforços. Um modelo muito utilizado é o chamado homogêneo. Nele o escoamento bifásico é considerado homogêneo e suas propriedades são determinadas a partir do vapor e do líquido na respectiva condição. Este modelo é utilizado por GOLDSCHMIDT (1991) ao fazer um estudo aplicado ao refrigerante R-22 em condição de regime permanente. SAMI & TRIBES (1998) fazem um estudo numérico do comportamento do capilar utilizando refrigerantes puros e misturas binárias, também baseado no modelo homogêneo. BANSAL & RUPASINGUE (1998) utiliza o modelo no estudo de tubos capilares adiabáticos empregando o R-134a como refrigerante. Analisando o fator de atrito bifásico, previsto no modelo homogêneo, WING & OOI (1995) avaliou diversas correlações para a determinação da viscosidade da mistura.

O modelo homogêneo, ao desconsiderar a existência de duas fases, líquido e vapor, não leva em conta as interações entre elas. Trabalhos que procuram incorporar esta característica ao modelo tem sido feitos, como o de LIN et al (1991) que propõe um modelo para a determinação da perda de carga local em tubos capilares utilizando o R-12. WONG & OOI (1996) faz um trabalho comparando o modelo homogêneo com o modelo de escoamentos separados.

A Análise de Incerteza, apesar de ser bastante usada, não é a única ferramenta Estatística disponível para avaliar dados experimentais. Muito pelo contrário, BOX & BISGAARD (1988) fazem uma excelente apresentação de várias ferramentas disponíveis, assim como destaca que estas foram as armas com que a indústria japonesa alcançou sua atual posição de destaque entre as grandes potências econômicas. Os autores, com base num exemplo, apresentam as deficiências de um procedimento experimental considerado ultrapassado, denominado “um fator de cada vez”. Ele estabelece que os fatores, dos quais um fenômeno depende, devem ser investigados experimentalmente variando-se um de cada vez, enquanto os demais são mantidos constantes. Neste caso algumas questões como: Em que níveis os fatores mantidos constantes devem ficar? Se mudarmos estes níveis o resultado será o mesmo? Tais perguntas ficam sem resposta se o procedimento não adquirir uma abrangência mais arrojada. Os autores fazem uma breve explanação de conceitos e ferramentas Estatísticas que vão bem mais além do que responder as questões acima.

O texto se divide nos seguintes tópicos: Planejamento Fatorial, Interações, Efeito de Bloco e Aleatoriedade, Planejamento Fatorial Fracionário, Frações Maiores, Método de Superfície de Resposta, Variação da Média, O Ambiente, Componentes de Variância, Teste de Vida. Os autores finalizam dizendo que o Planejamento de Experimentos não é uma idéia nova, ela seria caso se tornasse um procedimento padrão a nível de país. O estudo de fatores e suas interações pode proporcionar aos engenheiros de projeto mais resultados com menos recursos e mais rapidamente do que os métodos experimentais convencionais. É de interesse dos autores que engenheiros aprendam a usar a Estatística como um catalisador para a Engenharia e não como um substituto para ela. O aparecimento de programas de computador tem incentivado o uso da Estatística por parte dos engenheiros proporcionando fácil acesso aos resultados das análises dos experimentos.

CAFEO & THOMAS (1997) destacam que a variabilidade de um produto sempre depende da variação dos materiais e processos a que ele é submetido, desde o seu projeto até a sua fabricação. Resultados obtidos por simulação no desenvolvimento de um produto são normalmente confirmados por testes em protótipos, e estes resultados experimentais são normalmente considerados verdade absoluta. Entretanto, na realidade eles são sujeitos a uma variabilidade, cujo conhecimento é de importância crucial para se determinar a concordância entre o modelo e os ensaios. É ressaltado ainda que a existência de uma diferença entre teoria e experimento pode sugerir uma deficiência do modelo, que necessitaria ser refinado. Entretanto, esta conclusão só é correta quando este erro estiver além da faixa de incerteza dos dados experimentais. Caso contrário não haverá razão para o refinamento do modelo. Os autores relatam que a Estatística foi desenvolvida para entender e quantificar a variabilidade, e por outro lado a Engenharia costuma pensar, em geral, somente em termos determinísticos. Esta dicotomia pode levar os engenheiros a acreditar em efeitos que não sejam necessariamente reais. A introdução de melhorias nos produtos necessita, não somente de um conhecimento adquirido sobre variabilidade, mas também de uma implementação da Análise Estatística em todos os processos de desenvolvimento e produção de produtos. Infelizmente, complementam os autores, poucos engenheiros estão familiarizados com a Estatística a ponto de saber que ela vai muito além dos cálculos da média e

desvio padrão. O Planejamento de Experimentos, por exemplo, ainda é a melhor tecnologia conhecida para levantar os fatores mais importantes, dentre vários triviais, num determinado fenômeno, processo ou produto. Finalizando, uma descrição de alguns métodos que serão alvo de uma série de artigos futuros é feita.

Na série de artigos acima citada, encontramos trabalhos de cunho experimental que se utilizaram de Ferramentas Estatísticas na solução de problemas de Engenharia. Um deles, publicado por GU et al (1998), é aplicado ao desenvolvimento de produtos para a indústria automobilística na área de acústica. Utilizando a metodologia de Componentes de Variância, foram identificadas e quantificadas fontes de variabilidade do sistema de medida utilizado, o que permitiu eliminar e ou diminuir ruídos melhorando o processo.

Outra aplicação de Métodos Estatísticos, desenvolvida por POWELL (1997), foi feita no estudo da distribuição da resposta dinâmica de um protótipo de um componente aeroespacial, sujeito a vibrações randômicas. O trabalho analisou se a resposta espacial da variação estrutural do componente pode ser descrita por uma distribuição lognormal. O teste de Kolmogorov - Smirnov foi adotado para avaliar a distribuição analisada.

ROSLUND (1998) inicia seu artigo falando da necessidade de engenheiros e cientistas em separar o que é sinal do que é ruído. Neste sentido ressalta a importância do Planejamento de Experimentos para este tipo de problema. Em seguida desenvolve passo a passo uma aplicação da ferramenta num problema de vibração num automóvel.

O artigo de LUST & WU (1998) aborda o ramo da Engenharia de Estruturas através da aplicação de Métodos Estatísticos associados a resultados obtidos por métodos numéricos. Depois de uma introdução sobre definições e conceitos sobre Estatística o autor desenvolve estes conhecimentos num estudo de caso.

Considerando um parâmetro como sendo uma variável não determinística, podemos representa-la pela composição de dois valores, um fixo e outro aleatório. O valor fixo assume características determinísticas, e o aleatório pode ser estimado pelo estabelecimento de faixas com probabilidades associadas, ou seja, ele assume uma chance de estar num determinado intervalo. A relação entre esta

chance e o intervalo define o que chamamos de distribuição, a qual revela as faixas mais ou menos prováveis de se encontrar determinado valor aleatório. Dentre várias distribuições a mais comum é a Distribuição Normal sobre a qual muitos estudos foram feitos. PAEZ & HUNTER (1998) desenvolveram um trabalho motivado pela necessidade em avaliar a acuracidade da estimativa de parâmetros a partir de variáveis randômicas com distribuições de probabilidade desconhecidas.

A atomização de líquidos é um fenômeno usado em sistemas de injeção em câmaras de motores a combustão interna, e envolve diversas variáveis dimensionais e propriedades dos fluidos em questão. RUIZ & CHIGIER (1987) desenvolveu um trabalho a este respeito. As variáveis selecionadas foram 7 e os autores abordaram o problema usando Planejamento de Experimentos, Análise de Incerteza e Análise Dimensional. Uma avaliação foi feita envolvendo a quantidade necessária de experimentos em função do planejamento adotado. O planejamento escolhido foi o de três níveis conhecido como Box & Behnken, que pode ser visto em mais detalhes em BOX & BEHNKEN (1960) e também em DRAPER et al (1994). Superfícies de Resposta foram levantadas avaliando o comportamento das variáveis resposta analisadas.

Um gerador de água supersaturada foi desenvolvido e construído para um sistema de tratamento de água municipal. No artigo escrito por MURPHY et al (1998) um Planejamento de Experimentos foi desenvolvido para aumentar a geração de água supersaturada e também para reduzir o tempo de produção. Seis variáveis foram selecionadas como supostamente influentes sobre o sistema e o planejamento adotado foi um fatorial fracionário 2^{6-2} . Quatro fatores revelaram-se insignificantes e então foi levantada uma Superfície de Resposta para os dois restantes. Foi determinado um platô onde a produção do equipamento atingiu sua máxima produção.

O desenvolvimento de produtos a partir da experimentação de protótipos é uma prática de grande importância. BISGAARD & STEIMBERG (1997) desenvolveram um método de projeto e análise de protótipos que combina polinômios ortogonais com Planejamento Fatorial de dois níveis. Inicialmente o artigo ilustra o método aplicando-o a um problema de redução da emissão de monóxido de carbono de um motor de combustão interna. Sete fatores foram

estudados através de um planejamento 2^{7-4} , como resposta foram obtidas curvas com os valores da emissão de CO obtidas para três rotações do motor. Dois fatores revelaram os maiores efeitos e os outros cinco obtiveram valores bem inferiores. Em seguida os autores aplicam o método a um protótipo utilizado para controle de fluxo. Este caso mostra-se um pouco mais complexo, pois alguns componentes são variados em função do nível dos fatores. O planejamento usado foi um 2^3 e cada protótipo foi testado em seis diferentes condições de trabalho. Ao final é feita uma discussão a respeito das possíveis variações do método proposto com relação ao polinômio usado e também tendo em vista casos de alto custo para a obtenção dos protótipos.

O mapeamento de motores é um processo muito conhecido no setor automobilístico e consiste na modelagem do comportamento do motor mediante o ajuste de alguns parâmetros. LAWRENCE & DAVIS (1998) utilizando o que eles chamam de abordagem em dois estágios, fazem o mapeamento de um motor. A tática consiste em, numa primeira fase ajustar as curvas de avanço de centelha, e numa segunda etapa em avaliar como estas curvas se modificam em função de diversos parâmetros do motor. Os autores aplicam o método e verificam os resultados ressaltando que o desenvolvimento deve continuar para a parte de emissões.

A linha de descarga de sistemas frigoríficos pode ser usada como fonte de energia no aquecimento de água para uso doméstico. LEE & JONES (1997) publicaram um artigo a este respeito, onde um modelo matemático para estimar a capacidade de troca de calor de um sistema destes foi elaborado. Uma comparação entre dados calculados e experimentais foi feita juntamente com uma análise através de vários gráficos, e o erro máximo envolvido foi de 12%. Um estudo de sensibilidade das variáveis sobre o sistema foi desenvolvido a partir de um planejamento fatorial revelando os termos mais importantes na capacidade do equipamento.

O método de Planejamento de Experimentos utilizado a partir de resultados obtidos por métodos numéricos é o conteúdo do trabalho desenvolvido por RIZZO (1994). O autor faz um breve resumo das vantagens do método sobre a técnica tradicional de “uma variável de cada vez”. Um Planejamento de Experimentos foi elaborado para os resultados obtidos pelo método numérico elementos finitos, aplicado a uma haste sujeita a determinados esforços. Três

variáveis foram relacionadas e para avaliar os resultados foi levantada uma Superfície de Resposta. O autor finaliza enfatizando as vantagens do Planejamento de Experimentos quanto ao levantamento da variáveis mais significantes na resposta estudada, e lembrando que a Superfície de Resposta é apenas uma das diversas ferramentas disponíveis na parte de Planejamento de Experimentos.

Outro artigo desenvolvido numa linha semelhante a anterior, é o escrito por JANAJREH & HELLER (1993), que visa estudar o desempenho de motores para foguetes, com o uso de métodos numéricos em conjunto com a técnica de Superfície de Resposta. Um enfoque é dado para uma análise de confiabilidade do motor, e ao final concluiu-se que ela diminui com o aumento da carga ou com o aumento do tempo em estoque.

CHEN et al (1995) apresenta o conceito de projeto robusto sob dois pontos de vista, (1) o associado com a minimização do desvio do desempenho causado por ruídos ou variáveis não controladas, (2) o associado com a minimização do desvio de desempenho causado pela variação de algum fator, ou variável independente. Os autores propõe uma abordagem mais generalista que visa superar as limitações do modelo proposto por Taguchi através do uso do Método de Superfície de Resposta. É feita uma aplicação da proposta em um sistema de irrigação acionado por energia solar. Os autores concluem ressaltando que apesar de ter sido aplicado a um sistema térmico, a técnica pode ser utilizada na solução de vários problemas de engenharia. É ressaltado que está em processo de desenvolvimento um modelo de exploração do conceito de robustez, onde o método de Superfície de Resposta exerce um papel de grande importância.

As mais diversas áreas fazem uso de métodos Estatísticos para a solução de seus problemas. O projeto de discos rígidos de computador, relatado por NWOSU (1989), elabora um Planejamento Fatorial completo para cinco variáveis responsáveis por estragos provocados por choques, vibração e fadiga térmica. Os dados levantados para os experimentos foram obtidos numericamente através da técnica de Elementos Finitos. Os autores concluem relatando uma redução de aproximadamente 46% dos problemas.

KWANG et al (1994) também faz um trabalho avaliando a confiabilidade da solda feita em circuitos eletrônicos mediante a solicitações de

fadiga térmica. A ferramenta usada foi a Superfície de Reposta aliada à técnica de Elementos Finitos tridimensional. O autor termina dizendo que a comunhão entre as técnicas acelerou a obtenção dos resultados simplificando a análise.

Aplicações na área de controle de ruídos em veículos automotivos foram feitas por GUISET & TZANNETAKIS (1997). Foram usadas as técnicas de Otimização Numérica, Planejamento de Experimentos e Superfície de Resposta em conjunto com Elementos Finitos e Modelos de Elementos de Contorno para solucionar problemas de otimização da radiação e transmissão acústica.

O setor de fabricação também demonstra fazer uso de métodos Estatísticos como podemos verificar no trabalho de MATHEW et al (1999) no setor de usinagem de materiais compostos usando Planejamento de Experimentos, no estudo feito por CHOUDHURY & BARADIE (1999) sobre a usinabilidade do material Inconel 718 utilizando o Planejamento de Experimentos aliado à Superfície de Resposta e no trabalho de SOKOVIC & BAHOR (1998) sobre a inter relação entre certos parâmetros de usinagem no acabamento final obtido por uma ferramenta de corte sujeita a um determinado recobrimento, no qual usou um Planejamento Fatorial de três níveis, 2^3 , em conjunto com o método de Superfície de Resposta.

Áreas, um pouco fora do nosso contexto, que demonstraram fazer um uso intensivo de ferramentas Estatísticas foram a Engenharia de Alimentos e a Bioengenharia. Uma considerável quantidade de trabalhos foi publicada por estes segmentos, demonstrando a forma com que os setores procuram táticas diversas para desenvolver o avanço de seu conhecimento. Apesar de eficiente e aplicável a praticamente qualquer caso em que existam dados levantados experimentalmente, alguns setores só passaram a utilizar estes métodos nos últimos dez anos, e mesmo assim com alguma timidez. Este é exatamente o caso da área Térmica dentro da Engenharia Mecânica, cujas razões para tal já foram expostas por TAYLOR et al (1999) e JAMES et al (1995). Este contexto faz com que contribuições sejam não somente bem vindas, como também necessárias. Os argumentos aqui apresentados foram suficientes para elaborarmos um trabalho abordando esta carência e promovendo o desenvolvimento que ela pode proporcionar ao setor.

4 - METODOLOGIA

Conforme já mencionamos, o grande problema no projeto de um sistema frigorífico reside na determinação dos seus diversos componentes. Todos eles tem seu comportamento individualmente determinado e divulgado pelo fabricante. Um sistema frigorífico nada mais é do que uma associação destes componentes, cujo desempenho depende intimamente desta combinação. Um desafio neste segmento se encontra no dimensionamento do elemento de expansão, mais especificamente quando se trata de um tubo capilar.

Neste trabalho temos um sistema frigorífico previamente definido em todos os seus componentes com exceção do elemento de expansão. A proposta aqui foi a de determinar o tubo capilar que proporcionasse a melhor condição de funcionamento ao equipamento. Simultaneamente, a carga de refrigerante foi outra variável a ser determinada tendo em vista sua importância em sistemas de refrigeração que trabalham com tubos capilares. Com isso foram estabelecidas 3 variáveis independentes, o Diâmetro Interno do Tubo Capilar (D), o Comprimento do Tubo Capilar (C) e a Carga de Refrigerante (G). O problema se resumiu então em determinar qual a melhor combinação para estas três variáveis que proporcione a condição de funcionamento mais adequada para o equipamento.

Visando desempenho e longevidade selecionamos oito variáveis resposta de grande interesse para o equipamento, com base nas quais conduzimos um processo de otimização a partir da Metodologia Superfície de Resposta com base no Planejamento de Experimentos. As variáveis resposta foram as seguintes: Capacidade Frigorífica, Coeficiente de Eficácia, Super Aquecimento, Temperatura de Descarga, Sub Resfriamento, Vazão de Refrigerante, Temperatura de Evaporação e Temperatura de Condensação. Foi dada uma ênfase para a Capacidade de Refrigeração na busca pela região de ótimo e a partir daí foram analisadas as melhores condições de funcionamento perante as demais variáveis.

4.1 - Resumo Teórico

O conteúdo desenvolvido nesta seção é alvo de textos muito bem escritos e providos não apenas da teoria Estatística, mas também de aplicações interessantes e realistas. Entre as diversas publicações podemos citar três das quais fizemos grande uso, BOX et al (1978), MONTGOMERY (1997) e BOX & DRAPER (1987), pois serviram de referência do início ao fim deste trabalho. Os dois primeiros tratam do tema Planejamento de Experimentos e suas diversas ferramentas, e o terceiro enfoca especificamente o Método de Superfície de Resposta. Diante destas publicações nos ateremos a fazer uma breve relação de conceitos e métodos que foram utilizados no decorrer deste trabalho.

A **Estatística** é a ciência que estuda a **variabilidade**. Neste contexto as variáveis passam a ser valores providos de uma dispersão, na qual há uma incerteza envolvida. Um valor pode então ser estimado pelo levantamento de uma amostra que permite determinar sua ordem de grandeza através da média, e sua dispersão expressa, por exemplo, pela diferença entre ao maior e o menor valor medido.

Pensando num sistema interagindo com o meio que o cerca, podemos estabelecer estas interações como sendo a ação de determinadas variáveis, chamadas **variáveis independentes**. Este nome se deve à não existência de uma relação entre elas e qualquer outra variável influente ao sistema, dando-lhes uma característica de total independência em suas ações.

A ação das variáveis independentes sobre o sistema faz com que ele reaja em resposta ao estímulo, alterando as chamadas **variáveis resposta**. Medindo uma variável resposta constataremos que os resultados vão depender da posição assumida por certas variáveis independentes.

Variando-as de forma controlada, a partir de níveis pré estabelecidos, podemos medir o valor da resposta e eventualmente podemos constatar uma alteração significativa. Neste caso a diferença entre os valores obtidos para a resposta, antes e depois da ação das variáveis independentes determina o que chamamos de **efeito**. As variáveis independentes podem ser **quantitativas** ou **qualitativas**. Neste segundo caso ela assume tipos e não níveis, conforme teríamos no caso quantitativo. Desta forma a variável qualitativa realiza um efeito mediante a

mudança do tipo que ela pode assumir, definindo assim o que chamamos de **efeito de bloco** ou **tratamento**.

Entretanto, uma verificação de grande importância necessita ser feita. O valor do efeito deve ser suficientemente maior do que a dispersão da variável resposta, pois caso contrário ele poderá estar sendo confundido com uma variação aleatória e consequentemente não poderemos afirmar se ele existe ou não. Por esta razão torna-se importante estimar esta dispersão, chamada **erro experimental**. Para determiná-lo lançamos mão das **réplicas**, que são experimentos feitos em condições idênticas com a intenção de determinar o erro experimental.

Promovendo variações estratégicas podemos determinar quais variáveis foram as responsáveis por determinado efeito. Os **efeitos principais** são aqueles causados por uma variável isoladamente, ou seja, a resposta sofre uma alteração quando uma variável passa de seu nível inferior para o superior, qualquer que seja a posição das demais. Os **efeitos de interação** são os que ocorrem quando duas ou mais variáveis mudam de níveis simultaneamente, e com isso causam uma alteração na resposta. O que estamos fazendo com estas avaliações é analisar a reação da resposta frente às diversas combinações possíveis para os níveis das variáveis independentes.

Quando temos um sistema desconhecido é normal suspeitarmos de uma grande quantidade de variáveis como sendo influentes a uma certa resposta. Neste caso é interessante trabalharmos com apenas dois níveis (superior e inferior) para inicialmente descobrirmos quais os fatores mais importantes. A este tipo de análise denominamos **Planejamento Fatorial** em dois níveis. Para o caso de três variáveis, este planejamento pode ser visto esquematicamente na FIGURA 5(A). Cada eixo definido pelos lados do cubo estabelece um sentido de variação para cada variável. As esferas escuras nos vértices do cubo são os ensaios, cujo posicionamento está associado ao nível da variável independente. Ao lado direito temos a matriz planejamento, definindo x_1 , x_2 e x_3 como as variáveis independentes e y_i como a resposta obtida para cada ensaio, as quais vemos destacadas também na figura. Considerando o ponto claro no centro do cubo temos um Planejamento Fatorial com **ponto central**, que corresponde aos primeiros dez ensaios. O ponto central tem uma função importante na verificação de uma possível curvatura da resposta, e também na

determinação do erro experimental. Na figura podemos ver dois resultados para o ponto central, que ao ser replicado pelo menos uma vez, já permite a estimativa do erro experimental.

FIGURA 5 – (A) Planejamento Fatorial com ponto central. (B) Planejamento Composto Central.

Depois de determinadas as variáveis mais importantes através dos efeitos significativos, torna-se interessante estudá-las em maiores detalhes. Para isso partimos dos resultados já obtidos no Planejamento Fatorial, e ampliamos sua abrangência adicionando mais ensaios. Com isso obtemos o **Planejamento Composto Central**, visualizado na FIGURA 5(B), onde seis ensaios foram acrescentados estabelecendo cinco níveis para cada variável.

Existem casos onde apesar de sabermos da importância de certa variável não temos como controlá-la por razões técnicas ou mesmo econômicas, temos então uma **variável não controlada**. Neste caso devemos fazer com que ela mantenha-se variando de forma aleatória dentro da menor faixa possível. Com isso sua influência na resposta ocorrerá de uma forma aleatória colaborando somente para o aumento do erro como se fosse um ruído. Um exemplo muito pertinente a este respeito foi publicado por RADSON & HERRIN (1995).

A **análise de variância** feita para um planejamento com três variáveis e uma quantidade genérica de níveis e réplicas é apresentada na TABELA 1. Na coluna de esquerda temos as **Fontes de Variabilidade**, composta pelas variáveis e suas interações. A **Soma de Quadrados** representa a variabilidade total para termo da coluna à esquerda. Os **Graus de Liberdade** representam o tamanho da amostra relativa à respectiva Fonte de Variabilidade. O **Quadrado Médio** é a razão entre a Soma de Quadrados e o respectivo Grau de Liberdade, dando uma idéia da dispersão dos dados causada pela respectiva **Fonte de Variabilidade**.

Na última coluna temos o valor F, que é uma razão entre duas variabilidades. Mais especificamente entre a variabilidade de cada Fonte e a do Erro. A distribuição assumida por esta razão é a conhecida, e se chama **F de Snedecor**. Conhecendo os graus de liberdade relativos às duas variabilidades envolvidas, podemos determinar o nível de significância de F assumir aquele valor calculado.

A avaliação feita para a estatística F só é válida quando o resíduo ou erro resultante é independente e identicamente distribuído com distribuição Normal, desvio padrão constante e média igual a zero. A **análise do resíduo** pode ser feita inicialmente por um gráfico do erro em função dos valores lidos, ou pela ordem temporal. ANSCOMBE & TUKEY (1963) fazem um levantamento das técnicas de análise do resíduo tornando-as mais acessíveis, na intenção de torná-las mais

populares. Para uma verificação mais detalhada podem ser feitos **testes de normalidade** que estabelecem níveis de significância para a distribuição do erro, como o teste de **Kolmogorov - Smirnov**.

TABELA 1 – Quadro de Análise de Variância para uma quantidade genérica de níveis e réplicas.

Fontes de Variabilidade	Soma de Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	F
<i>A</i>	SQ_A	$a - 1$	QM_A	$F = SQ_A/SQ_E$
<i>B</i>	SQ_B	$b - 1$	QM_B	$F = SQ_B/SQ_E$
<i>C</i>	SQ_C	$c - 1$	QM_C	$F = SQ_C/SQ_E$
<i>AB</i>	SQ_{AB}	$(a - 1)(b - 1)$	QM_{AB}	$F = SQ_{AB}/SQ_E$
<i>AC</i>	SQ_{AC}	$(a - 1)(c - 1)$	QM_{AC}	$F = SQ_{AC}/SQ_E$
<i>BC</i>	SQ_{BC}	$(b - 1)(c - 1)$	QM_{BC}	$F = SQ_{BC}/SQ_E$
<i>ABC</i>	SQ_{ABC}	$(a - 1)(b - 1)(c - 1)$	QM_{ABC}	$F = SQ_{ABC}/SQ_E$
<i>Erro</i>	SQ_E	$abc(n - 1)$	QM_E	
<i>Total</i>	SQ_T	$abcn - 1$		

TABELA 2 – Quantidades de níveis e réplicas.

<i>Variável A</i>	$i = 1, 2, \dots, a$ (níveis)
<i>Variável B</i>	$j = 1, 2, \dots, b$ (níveis)
<i>Variável C</i>	$k = 1, 2, \dots, c$ (níveis)
<i>Réplicas</i>	$l = 1, 2, \dots, n$

$$SQ_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^c \sum_{l=1}^n y_{ijkl}^2 - \frac{y_{\dots}^2}{abcn} \quad (1)$$

$$SQ_A = \frac{1}{bcn} \sum_{i=1}^a y_{i\dots}^2 - \frac{y_{\dots}^2}{abcn} \quad (2)$$

$$SQ_B = \frac{1}{acn} \sum_{j=1}^b y_{\dots j\dots}^2 - \frac{y_{\dots}^2}{abcn} \quad (3)$$

$$SQ_C = \frac{1}{abn} \sum_{k=1}^c y_{\dots \dots k}^2 - \frac{y_{\dots}^2}{abcn} \quad (4)$$

$$SQ_{AB} = \frac{1}{cn} \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b y_{ij\dots}^2 - \frac{y_{\dots}^2}{abcn} - SQ_A - SQ_B \quad (5)$$

$$SQ_{AC} = \frac{1}{bn} \sum_{i=1}^a \sum_{k=1}^c y_{i\dots k}^2 - \frac{y_{\dots}^2}{abcn} - SQ_A - SQ_C \quad (6)$$

$$SQ_{BC} = \frac{1}{an} \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^c y_{.jk}^2 - \frac{y_{...}^2}{abcn} - SQ_B - SQ_C \quad (7)$$

$$SQ_{ABC} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^c y_{ijk}^2 - \frac{y_{...}^2}{abcn} - SQ_A - SQ_B - SQ_C - SQ_{AB} - SQ_{AC} - SQ_{BC} \quad (8a)$$

$$= SQ_{Subtotais(ABC)} - SQ_A - SQ_B - SQ_C - SQ_{AB} - SQ_{AC} - SQ_{BC} \quad (8b)$$

$$SQ_E = SQ_T - SQ_{Subtotais(ABC)} \quad (9)$$

Entretanto, a análise do resíduo pode não conseguir bons resultados, o que invalidaria qualquer conclusão. Neste caso pode-se lançar mão de uma **transformação**, que por meio de funções matemáticas reinterpreta os dados num novo formato cujo resíduo pode assumir as características desejadas. Alguns trabalhos a respeito como os de DRAPER & HUNTER (1969) e DOLBY (1963) dão uma idéia aprofundada do assunto.

Quando consideramos um ponto central podemos fazer a estimativa da **curvatura** da resposta. Esta estimativa é feita com base na seguinte expressão,

$$SQ_Q = \frac{n_F n_C (\bar{y}_F - \bar{y}_C)^2}{n_F + n_C} \quad (10)$$

Os efeitos relativos das fontes de variabilidade podem ser determinados a partir da matriz planejamento. Considerando o planejamento abaixo, se somarmos o resultado do produto das colunas x_i e y e dividirmos por 8, teremos o valor do efeito de x_i .

x_1	x_2	x_3	y
-1	-1	-1	y_1
1	-1	-1	y_2
-1	1	-1	y_3
1	1	-1	y_4
-1	-1	1	y_5
1	-1	1	y_6
-1	1	1	y_7
1	1	1	y_8
0	0	0	y_9
0	0	0	y_{10}

Este procedimento pode ser aplicado para os demais efeitos. No caso de efeitos de interação deve-se multiplicar as colunas da matriz planejamento relativa à interação e seguir o procedimento anterior. Por exemplo, o efeito de $x_1 \cdot x_3$ é definido pela soma do produto entre as colunas x_1 , x_3 e y dividido por 8. No fundo o que está sendo feito é o cálculo de uma diferença de valores médios entre as respostas obtidas. É interessante resaltar que os pontos centrais não colaboram para o cálculo, pois seus valores na coluna do planejamento são iguais a zero.

Os valores destes efeitos tem uma característica interessante.

Ao determinarmos um modelo, como o da EQUAÇÃO 11, para ajustar os dados levantados, os valores dos coeficientes β_i serão os próprios efeitos dos respectivos termos. Ou seja, o coeficiente β_3 assume o valor do efeito de x_3 , e assim por diante.

$$y = \beta_0 + \beta_1 \cdot x_1 + \beta_2 \cdot x_2 + \beta_3 \cdot x_3 + \beta_{12} \cdot x_1 \cdot x_2 + \beta_{13} \cdot x_1 \cdot x_3 + \beta_{23} \cdot x_2 \cdot x_3 + \beta_{123} \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \quad (11)$$

Analizando o problema pelo **Método dos Mínimos Quadrados**, veremos que quando utilizamos um Planejamento Fatorial estaremos num caso especial onde o cálculo dos coeficientes β_i torna-se bastante simplificado. Para exemplificar o desenvolvimento vamos usar um modelo mais simples, como o da EQUAÇÃO 12.

$$\hat{y} = \beta_0 + \beta_1 \cdot x_1 + \beta_2 \cdot x_2 + \beta_{12} \cdot x_1 \cdot x_2 \quad (12)$$

Definindo o *Erro* como o somatório da diferença ao quadrado entre o resultado experimental y_i e o seu respectivo valor ajustado $\hat{y}_i$, obtido através do polinômio. Temos a EQUAÇÃO 13.

$$Erro = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 = \sum_{i=1}^n [y_i - (\beta_0 + \beta_1 \cdot x_1 + \beta_2 \cdot x_2 + \beta_{12} \cdot x_1 \cdot x_2)]^2 \quad (13)$$

Os valores dos coeficientes que minimizam o *Erro* são o resultados de um ajuste feito pelo método dos Mínimos Quadrados. Para isso derivamos a EQUAÇÃO 13 em relação a todos os coeficientes do polinômio e a igualamos a zero.

$$\frac{\partial(\text{Erro})}{\partial\beta_0} = \sum_{i=1}^n (y_i - \beta_0 - \beta_1 \cdot x_1 - \beta_2 \cdot x_2 - \beta_{12} \cdot x_1 \cdot x_2) \cdot (-2) = 0 \quad (14)$$

$$\frac{\partial(\text{Erro})}{\partial\beta_1} = \sum_{i=1}^n (y_i - \beta_0 - \beta_1 \cdot x_1 - \beta_2 \cdot x_2 - \beta_{12} \cdot x_1 \cdot x_2) \cdot (-2) \cdot x_1 = 0 \quad (15)$$

$$\frac{\partial(\text{Erro})}{\partial\beta_2} = \sum_{i=1}^n (y_i - \beta_0 - \beta_1 \cdot x_1 - \beta_2 \cdot x_2 - \beta_{12} \cdot x_1 \cdot x_2) \cdot (-2) \cdot x_2 = 0 \quad (16)$$

$$\frac{\partial(\text{Erro})}{\partial\beta_{12}} = \sum_{i=1}^n (y_i - \beta_0 - \beta_1 \cdot x_1 - \beta_2 \cdot x_2 - \beta_{12} \cdot x_1 \cdot x_2) \cdot (-2) \cdot x_1 \cdot x_2 = 0 \quad (17)$$

Colocando as expressões na forma matricial temos,

$$\begin{bmatrix} n & \sum_{i=1}^n x_{1i} & \sum_{i=1}^n x_{2i} & \sum_{i=1}^n x_{1i} \cdot x_{2i} \\ \sum_{i=1}^n x_{1i} & \sum_{i=1}^n x_{1i}^2 & \sum_{i=1}^n x_{1i} \cdot x_{2i} & \sum_{i=1}^n x_{1i}^2 \cdot x_{2i} \\ \sum_{i=1}^n x_{2i} & \sum_{i=1}^n x_{1i} \cdot x_{2i} & \sum_{i=1}^n x_{2i}^2 & \sum_{i=1}^n x_{1i} \cdot x_{2i}^2 \\ \sum_{i=1}^n x_{1i} \cdot x_{2i} & \sum_{i=1}^n x_{1i}^2 \cdot x_{2i} & \sum_{i=1}^n x_{1i} \cdot x_{2i}^2 & \sum_{i=1}^n x_{1i}^2 \cdot x_{2i}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \beta_2 \\ \beta_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n y_i \\ \sum_{i=1}^n y_i \cdot x_{1i} \\ \sum_{i=1}^n y_i \cdot x_{2i} \\ \sum_{i=1}^n y_i \cdot x_{1i} \cdot x_{2i} \end{bmatrix} \quad (18)$$

A matriz que se formou é simétrica, e no caso de um Planejamento Fatorial seus valores são todos iguais a zero com exceção da diagonal. Neste caso o cálculo dos coeficientes fica bastante simplificado, e coincide com o procedimento que descrevemos para o cálculo dos efeitos. Quando obtemos este tipo de situação dizemos que o planejamento é **ortogonal**. Os planejamentos ortogonais definem os ensaios de modo a levantar estrategicamente apenas os resultados dos termos principais e de interações das variáveis envolvidas.

O **Método de Superfície de Resposta**, se utiliza do polinômio ajustado para avaliar o comportamento de uma resposta frente aos valores das

variáveis independentes que agem sobre o objeto de estudo. A busca de respostas que alcancem valores extremos como máximos ou mínimos é um objetivo desta ferramenta, ou então a manutenção de uma resposta em certos níveis. **Pontos estacionários** são posições onde a variação da resposta é nula, ou muito pequena, em relação às variações das variáveis independentes, nestes pontos podem haver um máximo, um mínimo ou um ponto de sela. Para determinarmos o posicionamento destes pontos pode-se lançar mão de diversos procedimentos, onde um deles é o **Steepest Ascent**. Pontos estacionários se localizam em regiões notoriamente curvas. Distantes destes setores a superfície assume pouca ou nenhuma curvatura, podendo ser bem representada por um polinômio linear. Os coeficientes deste polinômio são utilizados pelo método Steepest Ascent, por indicar a direção sobre a qual ocorrem as maiores variações na resposta. Realizando ensaios ao longo deste caminho, e observando os valores da resposta podemos encontrar o ponto desejado, seja ele de máximo, mínimo, ou sela.

Ao determinarmos um ponto estacionário, uma avaliação bastante interessante a ser feita é a **Análise Canônica**. Através de uma transformação do sistema de coordenadas, eliminam-se os termos de interação e a origem passa a ser o ponto estacionário. Os coeficientes na forma Canônica revelam a sensibilidade ao longo dos novos eixos, e no caso de existirem no máximo três variáveis, também definem o tipo de superfície gerada pelas variáveis e a resposta.

Os diversos procedimentos de cálculo aqui citados, e outros mais, foram desenvolvidos no presente trabalho, a partir do programa de computador Statistica 5.1B. A existência deste e diversos outros programas do gênero tem colaborado para que os métodos de Planejamento de Experimentos se tornem populares, pois eliminam um dos grandes impedimentos que é a grande quantidade de cálculos envolvidos, mesmo em aplicações relativamente simples.

4.2 - Estratégia de Otimização

A Capacidade de Refrigeração foi designada como a variável de maior relevância na busca pelo ponto de ótimo. Ou seja, a estratégia levou em conta apenas esta variável para a determinação da região de ótimo, ou região do ponto estacionário, a partir da qual as demais variáveis resposta foram exploradas. Este procedimento foi adotado tendo em vista que mercadologicamente o aspecto mais relevante é em geral a Capacidade Frigorífica, seguido normalmente, pela Eficiência. Atualmente verificamos uma tendência de inversão desta hierarquia ditada por uma nova filosofia de desenvolvimento de produtos. Desta forma poderíamos simplesmente ter reposicionado as variáveis e conduzido o trabalho da mesma forma. Uma outra abordagem que poderia ter sido adotada seria o levantamento das regiões de ótimo individualmente para cada variável resposta em que houvesse interesse. Ao determina-las deve-se procurar uma região comum definida pela interseção entre todas e esta será a região de ótimo. Entretanto existe a possibilidade destas regiões estarem posicionadas distantes umas das outras não existindo uma interseção, e aí será necessário definir uma hierarquia entre as respostas. Ou então definir um setor intermediário que apesar de não ser a região de ótimo para nenhuma das variáveis isoladamente, poderá ser a melhor para o sistema.

Normalmente quando estamos iniciando uma investigação a localização da região de ótimo é desconhecida pelo pesquisador. Desta forma a primeira especulação é usualmente feita distante do alvo, onde a superfície assume pouca ou nenhuma curvatura podendo ser bem representada por um polinômio de primeira ordem. Nestas condições a execução de um planejamento fatorial com dois níveis torna-se bastante adequada tendo em vista a predominância da linearidade. Entretanto, é interessante que um ponto central, com uma ou mais réplicas, seja levantado para verificação da curvatura e do erro experimental. No caso aqui desenvolvido foi este o procedimento adotado numa primeira etapa, a qual chamamos de Fase 1. Utilizamos o ASHRAE (1979) como referência para a tentativa inicial das dimensões do capilar. Nela temos um gráfico de seleção preliminar onde através da Capacidade Frigorífica do compressor pode-se selecionar de forma aproximada o Diâmetro e Comprimento do capilar.

A segunda etapa, ou Fase 2 foi desenvolvida a partir dos resultados da primeira, que levantou a direção pela qual caminhamos para obter os dados que nos levaram à região de ótimo. Esta etapa foi constituída por dose experimentos em torno da direção estabelecida pelo gradiente em que constatamos um aumento da variável resposta seguido de uma redução, dando indícios de uma região de máximo.

Baseados nestes resultados desenvolvemos mais um planejamento fatorial com ponto central focado no ponto mais indicado para o centro da região de ótimo, definindo assim a Fase 3. Após averiguarmos que aquela era realmente uma região de ótimo acrescentamos os ensaios suficientes ao Planejamento Fatorial e o transformamos num Planejamento Composto Central. Com isso pudemos explorar e analisar a região adequadamente, não apenas em relação à Capacidade Frigorífica, mas também em relação às demais variáveis resposta.

5 - ENSAIO

5.1 - Descrição do Equipamento

O sistema ensaiado trata-se de um ciclo frigorífico básico utilizando refrigerante R22. A condensação é a ar e a evaporação ocorre numa serpentina helicoidal. Ela resfria o líquido contido num recipiente onde a carga térmica é gerada por uma resistência elétrica. O elemento de expansão é um tubo capilar de cobre específico para refrigeração. O desenho esquemático do circuito frigorífico com seus diversos componentes pode ser visto na FIGURA 6. Tendo em vista que os ensaios exigiriam uma constante modificação do capilar, foram colocados dois registros manuais, antes e depois dele, para permitir que esta troca fosse feita com a frequência necessária.

FIGURA 6– Esquema do Equipamento Frigorífico

5.1.1 - Compressor

O compressor empregado é do tipo hermético e monocilindro para aplicação com refrigerante R22. Suas características técnicas são:

Fabricante: Tecunseh.

Modelo: AE 5470 ES

Tensão da Rede: 220 V

Frequência de Rede: 60Hz

5.1.2 - Condensador

O condensador é do tipo tubo aletado com ventilação forçada. Suas características são:

Altura: 0,22m

Largura: 0,30m

Profundidade: 0,08m

Número de Passes: 16

Número de Fileiras: 2

Tubo de Cobre,

Diâmetro Externo: 9,52mm

Diâmetro Interno: 8,66mm

Aletamento,

Material: alumínio

Espessura: 0,0001m

Número de Aletas por Polegada: 8

Ventilador,

Fabricante: Eberle

Modelo: 1/25

Potência: 20mhp

Número de Pás da Hélice: 5

Tensão da Rede: 220V

Frequência da Rede: 60 Hz

5.1.3 - Tubo Capilar

Foram utilizados diversos comprimentos e diâmetros de tubo capilar ao longo deste trabalho, conforme veremos a seguir. Suas características básicas são:

Fabricante: TBF (Tubos Beneficiados Finos) – Metalúrgica,

Material: cobre refrigeração liga C12200.

5.1.4 - Evaporador

O evaporador utilizado no sistema frigorífico é uma serpentina helicoidal, com 16 espiras em tubo de cobre, atuando como resfriador de um banho de líquido. Para evitar problemas de congelamento utilizamos um banho de etileno glicol.

FIGURA 7 - Desenho esquemático do evaporador.

A FIGURA 7 traz um desenho esquemático do evaporador onde podem ser verificadas suas dimensões, formato e disposição da serpentina. Podemos verificar também uma resistência elétrica utilizada como carga térmica para o sistema. O circuito elétrico que faz o controle da potência dissipada pela resistência aparece aqui de forma simplificada, no entanto, ele pode ser visualizado em detalhes na FIGURA 9. O tubo de cobre usado tem um diâmetro interno igual a 8,66mm e externo igual a 9,52mm.

Uma bomba promove a agitação do líquido contido no recipiente, e tem as seguintes características:

Fabricante: Mallory

Tensão da Rede: 220V

Frequência da Rede: 60 Hz

5.2 - Procedimento Experimental

O procedimento adotado para o desenvolvimento da parte experimental foi constituído pela medição, em regime permanente, das pressões de condensação e evaporação, da potência consumida pelo compressor, da tensão e corrente aplicados na resistência elétrica, da temperatura ambiente, da temperatura do banho, da temperatura do sub resfriado e da temperatura de sucção. Os pontos onde foram feitas as medições das temperaturas e pressões podem ser vistos esquematicamente na FIGURA 8.

FIGURA 8 – Pontos onde foram feitas as medidas de pressão e temperatura.

T1 = Temperatura de Sucção (Tsuc).

T2 = Temperatura de Descarga (Tdesc).

T3 = Temperatura do Sub Resfriado (Tsub).

T4 = Temperatura Ambiente (Tamb).

T5 = Temperatura do Banho.

P1 = Pressão de Evaporação (Pevap).

P2 = Pressão de Condensação (Pcond).

As temperaturas foram medidas através de um sistema de aquisição com sensores do tipo PT-100, onde os sinais foram amplificados e transformados por um conversor analógico digital e enviados para um micro computador PC 386 40MHz. As pressões foram obtidas através de dois manômetros (Fabricante: Imperial Eastman), sendo um de alta e outro de baixa pressão. Os ensaios foram realizados numa condição de regime permanente com o banho a uma temperatura de 5°C. Para uma eficiente avaliação da condição de regime permanente, esta temperatura foi monitorada ao longo do tempo na tela do computador. O sistema era considerado em regime permanente quando a Temperatura do Banho alcançava uma variação de $\pm 0,1^\circ\text{C}$ ao longo de um período mínimo de 10 minutos. Para alcançarmos esta condição a potência dissipada pela resistência elétrica foi controlada pelo circuito descrito na FIGURA 9, permitindo a regulação da tensão e corrente aplicadas. O procedimento foi então o de controlar manualmente a potência dissipada pela resistência até que a Temperatura do Banho se mantivesse constante e igual a 5°C.

FIGURA 9 - Circuito elétrico usado para regular a potência dissipada pela resistência elétrica.

O reostato observado na FIGURA 9 faz parte de um variador de tensão com as seguintes características,

Fabricante: Sociedade Técnica Paulista S.A.

Nome: Varivolt

Entrada: 220V

Saída: 0 – 240V

Corrente Máxima: 12,5 Amp.

kVA Máximo: 3

Tipo: VM – 230

Indústria Brasileira

Nas Fases 1 e 2 deste trabalho foram monitoradas as temperaturas do banho e ambiente, e também a tensão e corrente aplicadas na resistência elétrica. Na Fase 3 foram medidas, além dos parâmetros anteriores, a potência consumida pelo compressor, as pressões de evaporação e condensação e as temperaturas do sub resfriado, sucção e descarga. Os sensores de temperatura designados para medir a temperatura do refrigerante foram fixados externamente aos tubos, nos pontos indicados, por uma fita adesiva metálica. Um isolamento térmico também foi providenciado por meio de uma espuma de borracha para evitar a influência da temperatura ambiente na medição. Estes detalhes podem ser vistos na FIGURA 10. Para reduzir a resistência térmica entre o sensor e a parede do tubo foi colocada uma pasta térmica nos pontos de contato.

FIGURA 10 - Detalhe da fixação do sensor em pontos de medida da temperatura do refrigerante.

A medição da potência consumida pelo motor elétrico do compressor foi feita através de um wattímetro. O circuito elétrico com as ligações pode ser visto na FIGURA 11, onde verificamos as quatro conexões do aparelho. Duas delas são relativas à bobina de corrente (B. C.) ligada em série com o

compressor, e as outras duas são relativas à bobina de tensão (B. V.) ligada em paralelo.

FIGURA 11 - Esquema elétrico para a medição da potência consumida pelo compressor.

As características do medidor de potência são,

Fabricante: Made in Czechoslovakia.

Tensão: chave seletora com três posições 60, 120 e 240V

Corrente: chave seletora com duas posições 2,5 e 5A

A carga de refrigerante assumiu diversos valores em função dos ensaios previstos. Foi utilizada uma garrafa provida de um tubo externo transparente e graduado por onde o nível do seu conteúdo podia ser visualizado, permitindo mensurar a carga inserida no sistema. Uma resistência elétrica no interior da garrafa promovia o seu aquecimento, fazendo com isso a transferência do refrigerante para o equipamento, o qual já se encontrava preparado sob vácuo. A menor divisão da escala equivalia a 12,5g de refrigerante e a sua capacidade total 2kg.

5.3 - Resultados Experimentais

Os resultados experimentais foram levantados segundo as três fases descritas na seção 4.2. Os resultados colhidos podem ser observados na TABELA 4 para a Fase 1, na TABELA 6 para a Fase 2, na TABELA 8 para a Fase 3 e na TABELA 9 para a réplica da Fase 3. Podemos verificar também os planejamentos adotados através das variáveis independentes apresentadas na forma codificada (x_1 , x_2 e x_3) e na forma natural (D, C e G). Nas colunas do lado direito estão os parâmetros que foram lidos diretamente nos equipamentos de medição. Na última coluna do lado direito temos os valores observados para Temperatura Ambiente a qual se constituiu numa variável não controlada.

A coluna intitulada “Ordem Temporal” revela a ordem com que foram feitos os ensaios, na qual constata-se uma sequência aleatória. Este procedimento visa anular a influência que outras variáveis independentes, além das abordadas neste trabalho, possam exercer sobre as variáveis resposta estudadas. A aleatorização é uma premissa do Planejamento de Experimentos que busca garantir uma distribuição randômica para o resíduo, atestando com isso a validade do modelo proposto, conforme veremos mais a frente na seção de Análise dos Resultados.

Os valores para o Diâmetro Interno do Tubo Capilar utilizados na Fase 3, para os níveis $\pm 1,68$ de x_1 , não foram os que vemos nas tabelas acima citadas. As medidas disponíveis mais próximas que conseguimos, e que efetivamente usamos, foram $\varnothing 0,91\text{mm}$ e $\varnothing 1,78\text{mm}$ em substituição à $\varnothing 0,88\text{mm}$ e $\varnothing 1,82\text{mm}$. Averiguamos uma diferença em torno de 2 a 3%, considerada desprezível, tendo em vista que são da mesma ordem de grandeza dos erros de fabricação, em torno de 0,05mm segundo SCHULZ (1985).

O Diâmetro e Comprimento do Capilar estimados inicialmente para a Fase 1, foram determinados através do Diagrama de Seleção Preliminar do ASHRAE (1979). A referência sugere as dimensões do capilar a partir da Capacidade estimada do compressor e do refrigerante empregado. Partindo das informações de catálogo do fabricante do compressor, apresentada na FIGURA 12, pudemos ter uma idéia da sua Capacidade Frigorífica em função das Temperaturas de Evaporação e Condensação, sendo esta última representada por cada linha traçada com o respectivo

valor na legenda. Considerando que o sistema aqui estudado vai esfriar um banho a uma temperatura constante de 5°C, sabemos que a Temperatura de Evaporação será inferior a este valor. Entretanto, como desconhecemos o valor correto selecionamos esta temperatura como referência para estimativa da capacidade. Considerando os dois extremos da faixa de Temperaturas de Condensação estipulada pelo catálogo, encontramos capacidades entre 1800 e 2200W. Com esta faixa e considerando o refrigerante R-22, selecionamos três capilares pelo Diagrama de Seleção Preliminar, que foram: Ø1,5 x 2500mm; Ø1,37 x 1500mm e Ø1,24 x 800mm. O diâmetro com a medida mais próxima comercialmente encontrado foi Ø1,35mm. Portanto, definimos as medidas Ø1,35 x 1500mm para o capilar utilizado no ponto central do planejamento da Fase 1. Iniciamos com uma Carga de Refrigerante de 50 e 150g, e verificamos que para o nível inferior a Capacidade Frigorífica era praticamente nula e então passamos para 75g.

FIGURA 12 – Curva de Capacidade Frigorífica do compressor fornecida pelo fabricante.

TABELA 3 - Níveis das Variáveis Independentes da Fase 1.

Variáveis Independentes	Níveis		
	Inferior (-1)	Intermediário (0)	Superior (+1)
D = Diâmetro Interno do Capilar [mm]	1,07	1,35	1,63
C = Comprimento do Capilar [m]	1,0	1,5	2,0
G = Carga de Refrigerante R-22 [g]	75	112,5	150

TABELA 4 - Resultados experimentais da Fase 1.

Ordem Temporal	Ensaio Nro	Variáveis Codificadas			Variáveis Naturais			Parâmetros Medidos		
		x_1	x_2	x_3	[mm] D	[m] C	[g] G	[V] Tensão	[A] Corrente	[°C] Tamb
(1)	1	-1	-1	-1	1,07	1	75	42	2,02	28,5
(8)	2	1	-1	-1	1,63	1	75	10	0,50	30,5
(6)	3	-1	1	-1	1,07	2	75	27	1,22	31
(2)	4	1	1	-1	1,63	2	75	18	0,83	30
(5)	5	-1	-1	1	1,07	1	150	96	5,02	31,5
(4)	6	1	-1	1	1,63	1	150	95	4,8	32
(3)	7	-1	1	1	1,07	2	150	75	3,65	31,5
(10)	8	1	1	1	1,63	2	150	112	5,98	28,5
(7)	9	0	0	0	1,35	1,5	112,5	60	3,00	29,5
(9)	10	0	0	0	1,35	1,5	112,5	59	2,93	29,5
(11)	11	0	0	0	1,35	1,5	112,5	68	3,11	28,5

TABELA 5 - Níveis das Variáveis Independentes da Fase 2.

Variáveis Independentes	Níveis						
	0	+1	+2	+3	+4	+5	+6
D = Diâmetro Interno do Capilar [mm]	1,35	1,63	-	-	-	-	-
C = Comprimento do Capilar [m]	1,5	-	-	-	-	-	-
G = Carga de Refrigerante R-22 [g]	112,5	150,0	187,5	225,0	262,5	300,0	337,5

TABELA 6 - Resultados experimentais da Fase 2.

Ordem Temporal	Ensaio Nro	Variáveis Codificadas			Variáveis Naturais			Parâmetros Medidos		
		x_1	x_2	x_3	[mm]	[m]	[g]	[V]	[A]	[°C]
					D	C	G	Tensão	Corrente	Tamb
(12)	12	0	0	1	1,35	1,50	150,0	110,2	6,03	24,5
(13)	13	1	0	1	1,63	1,50	150,0	124,7	6,53	24,5
(15)	14	0	0	2	1,35	1,50	187,5	130,6	7,23	25,3
(14)	15	1	0	2	1,63	1,50	187,5	133,1	7,15	25,2
(16)	16	0	0	3	1,35	1,50	225,0	144,3	7,34	24,0
(17)	17	1	0	3	1,63	1,50	225,0	131,3	7,30	24,0
(18)	18	0	0	4	1,35	1,50	262,5	148,7	7,85	24,8
(19)	19	1	0	4	1,63	1,50	262,5	133,2	6,92	24,4
(20)	20	0	0	5	1,35	1,50	300,0	140,6	7,58	25,2
(21)	21	1	0	5	1,63	1,50	300,0	122,1	6,33	25,6
(22)	22	0	0	6	1,35	1,50	337,5	125,1	7,12	25,7
(23)	23	1	0	6	1,63	1,50	337,5	101,2	5,03	25,2

TABELA 7 - Níveis das Variáveis Independentes da Fase 3.

Variáveis Independentes	Níveis				
	+1,68	+1	0	-1	-1,68
D = Diâmetro Interno do Capilar [mm]	1,82	1,63	1,35	1,07	0,88
C = Comprimento do Capilar [m]	3,34	3,0	2,50	2,0	1,66
G = Carga de Refrigerante R-22 [g]	346,6	312,5	262,5	212,5	178,4

TABELA 8 - Resultados experimentais da Fase 3.

Ordem Temporal	Ensaio Nro	Variáveis Codificadas			Variáveis Naturais			Parâmetros Medidos								
		x_1	x_2	x_3	[mm]	[m]	[g]	[V]	[A]	[W]	[kPa] abs.	[kPa] abs.	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
					D	C	G	Tensão	Corrente	Pot	Pevap	Pcond	Tdes	Tsuc	Tsub	Tamb
(27)	24	-1	-1	-1	1,07	2,00	212,5	116,5	6,34	570	294	2066	97,1	17,1	40,5	25,0
(25)	25	1	-1	-1	1,63	2,00	212,5	136,8	6,66	800	494	2480	98,2	12,9	47,2	24,0
(24)	26	-1	1	-1	1,07	3,00	212,5	111,3	5,65	510	246	1825	88,2	16,7	35,1	23,5
(26)	27	1	1	-1	1,63	3,00	212,5	135,6	7,15	750	446	2445	99,1	14,2	46,9	24,5
(29)	28	-1	-1	1	1,07	2,00	312,5	146,2	7,35	875	515	3169	104,0	7,1	47,7	27,0
(32)	29	1	-1	1	1,63	2,00	312,5	119,1	6,44	870	536	2790	79,6	6,4	51,6	26,5
(31)	30	-1	1	1	1,07	3,00	312,5	142,4	7,63	760	425	2942	108,4	14,9	41,3	27,0
(30)	31	1	1	1	1,63	3,00	312,5	124,5	6,7	870	532	2859	82,0	7,4	52,6	26,5
(28)	32	0	0	0	1,35	2,50	262,5	140,7	7,76	860	515	2928	98,8	7,3	53,2	26,5
(43)	33	0	0	0	1,35	2,50	262,5	142,1	7,76	850	515	2838	95,1	5,7	50,9	26,2
(37)	34	0	0	1,68	1,35	2,50	346,6	127,3	6,88	890	536	3169	89,8	5,2	54,8	28,5
(38)	35	0	0	-1,68	1,35	2,50	178,4	126,6	6,86	690	384	2411	100,7	16,7	47,2	28,5
(46)	36	0	1,68	0	1,35	3,34	262,5	146,7	8,01	840	501	2859	102,5	4,6	50,3	26,2
(47)	37	0	-1,68	0	1,35	1,66	262,5	139,1	7,65	850	515	2804	90,6	4,7	50,7	26,0
(44)	38	1,68	0	0	1,82	2,50	262,5	124,2	6,71	860	536	2687	81,3	5,7	49,7	26,3
(45)	39	-1,68	0	0	0,88	2,50	262,5	101,4	5,45	480	219	1859	89,1	16,5	31,0	26,2

TABELA 9 - Resultados experimentais. Réplica da Fase 3.

Ordem Temporal	Ensaio Nro	Variáveis Codificadas			Variáveis Naturais			Parâmetros Medidos								
		x_1	x_2	x_3	[mm]	[m]	[g]	[V]	[A]	[W]	[kPa] abs.	[kPa] abs.	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
					D	C	G	Tensão	Corrente	Pot	Pevap	Pcond	Tdes	Tsuc	Tsub	Tamb
(41)	40	-1	-1	-1	1,07	2,00	212,5	123,5	6,7	620	329	2204	95,0	16,2	42,4	27,0
(55)	41	1	-1	-1	1,63	2,00	212,5	136,5	7,3	835	522	2597	97,7	6,9	48,7	26,5
(40)	42	-1	1	-1	1,07	3,00	212,5	116,4	6,6	550	274	1997	95,7	16,6	37,6	25,2
(42)	43	1	1	-1	1,63	3,00	212,5	141,2	7,5	810	487	2631	101,1	13,3	49,2	26,5
(36)	44	-1	-1	1	1,07	2,00	312,5	148,7	7,8	855	498	3100	114,3	11,0	48,0	27,0
(33)	45	1	-1	1	1,63	2,00	312,5	117,8	6,2	880	543	2824	83,2	4,9	50,8	27,5
(35)	46	-1	1	1	1,07	3,00	312,5	135,7	6,9	720	391	2790	107,2	14,0	41,6	28,0
(34)	47	1	1	1	1,63	3,00	312,5	125,0	6,7	880	536	2893	85,9	4,8	51,8	27,5
(48)	48	0	0	0	1,35	2,50	262,5	145,8	8,1	840	508	2790	96,3	4,3	49,8	26,0
(49)	49	0	0	0	1,35	2,50	262,5	146,1	7,8	850	508	2824	96,5	5,1	50,1	24,0
(54)	50	0	0	1,68	1,35	2,50	346,6	125,9	6,6	880	536	3135	85,9	6,8	55,3	28,2
(39)	51	0	0	-1,68	1,35	2,50	178,4	130,7	6,9	640	353	2080	92,6	13,9	40,5	24,0
(50)	52	0	1,68	0	1,35	3,34	262,5	148,5	8,1	830	498	2790	102,6	6,6	49,7	24,5
(51)	53	0	-1,68	0	1,35	1,66	262,5	137,0	7,4	870	529	2997	95,2	5,4	53,3	25,5
(53)	54	1,68	0	0	1,82	2,50	262,5	118,6	6,3	870	543	2790	86,1	6,8	52,6	28,0
(52)	55	-1,68	0	0	0,88	2,50	262,5	101,9	5,3	500	239	2032	97,4	18,5	34,2	27,0

6 - ANÁLISE DOS RESULTADOS

A análise dos resultados foi feita segundo as fases anteriormente descritas de acordo com os passos estabelecidos pelo Método Superfície de Resposta. Para as três etapas definidas, atribuímos os seguintes nomes: Fase 1 - Especulação Inicial, Fase 2 - Procura pela Região de Ótimo e Fase 3 - Exploração da Região de Ótimo.

6.1 - Fase 1: Especulação Inicial

A Fase 1 foi desenvolvida com base num planeamento fatorial completo (2^3), com ponto central replicado duas vezes, totalizando 11 experimentos. A partir dos dados da TABELA 4 construímos a TABELA 10, onde podemos verificar o planeamento com as variáveis independentes na forma codificada (x_1 , x_2 e x_3) e natural (D, C e G). Ambas exprimem os limites de variação de modos distintos, sendo que na forma natural temos os reais valores com suas respectivas unidades e na forma codificada os valores são divididos pela faixa de variação e assim transformam-se em números adimensionais. A última coluna da direita traz os valores da variável resposta, Capacidade Frigorífica (Q_e), determinada a partir do produto entre a tensão e a corrente aplicadas à resistência elétrica que atuou simulando a carga térmica. A Capacidade Frigorífica foi considerada como sendo igual a potência dissipada pela resistência elétrica. Esta aproximação incorre num erro sistemático devido às perdas para o ambiente, que interfere igualmente em todos os ensaios não afetando, portanto, o posicionamento da região de ótimo.

TABELA 10 - Resultados obtidos na Fase I.

Ensaio	Variáveis Independentes						Variável Resposta
	Codificadas			Naturais			[W] Qe
	x_1	x_2	x_3	[mm] D	[m] C	[g] G	
1	-1	-1	-1	1,07	1,0	75,0	84,8
2	1	-1	-1	1,63	1,0	75,0	5,0
3	-1	1	-1	1,07	2,0	75,0	32,9
4	1	1	-1	1,63	2,0	75,0	14,9
5	-1	-1	1	1,07	1,0	150,0	481,9
6	1	-1	1	1,63	1,0	150,0	456,0
7	-1	1	1	1,07	2,0	150,0	273,8
8	1	1	1	1,63	2,0	150,0	669,8
9	0	0	0	1,35	1,5	112,5	180,0
10	0	0	0	1,35	1,5	112,5	172,9
11	0	0	0	1,35	1,5	112,5	211,5

As EQUAÇÕES 19, 20 e 21 trazem a relação entre as variáveis independentes na forma natural e codificada.

$$x_1 = \frac{(D - 1,35)}{0,28} \quad (19)$$

$$x_2 = \frac{(C - 1,5)}{0,5} \quad (20)$$

$$x_3 = \frac{(G - 112,5)}{37,5} \quad (21)$$

A TABELA 11 apresenta a Análise de Variância relativa aos dados levantados no planejamento elaborado nesta fase. Nela podemos observar as Fontes de Variabilidade (F. V.), Soma dos Quadrados (S.Q.), Graus de Liberdade (G.L.), Quadrado Médio (Q.M.), Estatística F e Probabilidades (P). Observando a coluna P verificamos que à sua direita temos alguns marcadores que indicam os fatores mais importantes. O nível de significância pode ser verificado através da probabilidade P que ao assumir altos valores indica uma grande chance daquele fator não se sobressair comparativamente ao erro. Isso os torna passíveis de serem desprezados como efeitos, passando a colaborar no cálculo da estimativa do erro. Considerando um nível de significância crítico de 5% podemos constatar que apenas os termos com $P < 0,05$ estão assinalados.

TABELA 11 - Análise de Variância dos resultados obtidos no planejamento da Fase I.

Fontes de Variabilidade (F.V.)	S.Q.	G.L.	Q.M.	F	P	Efeitos
Interseção / Média		1				252,4
Curvatura	9014	1	9014	21,4	0,044	✓ -128,6
x_1 - Diâmetro do Capilar (D)	165	1	165	0,4	0,59	-9,1
x_2 - Comprimento do Capilar (C)	9265	1	9265	22,0	0,043	✓ 68,1
x_3 - Carga de Refrigerante (G)	380066	1	380066	900,4	0,001	✓ 435,9
$x_1 x_2$	29254	1	29254	69,3	0,014	✓ 120,9
$x_1 x_3$	27370	1	27370	64,8	0,015	✓ 117,0
$x_2 x_3$	283	1	283	0,7	0,50	11,9
$x_1 x_2 x_3$	16208	1	16208	38,4	0,025	✓ 90,0
Resíduo	844	2	422			
Total	472469	11				

A última coluna da direita traz os valores dos efeitos proporcionados pelas respectivas fontes de variabilidade. Analisando os termos isoladamente, verificamos que x_2 tem um efeito principal insignificante, entretanto, atua através das interações $x_1.x_2$ e $x_1.x_2.x_3$. Desta forma podemos dizer que a influência de x_2 está condicionada aos níveis das outras variáveis. Comparando a FIGURA 15, obtida para os resultados obtidos considerando o nível inferior de x_2 , com a FIGURA 16, para o nível superior de x_2 , podemos verificar que a superfície sofre uma distorção, que é uma reação típica de efeitos de interação.

A FIGURA 13 traz graficamente os valores das variâncias (Q.M.) significativas em função das respectivas Fontes de Variabilidade. Verifica-se uma grande influência da variável x_3 , as demais assumem valores bem inferiores. Podemos verificar também que os dados apresentam uma pequena influência com relação à curvatura, como era de se esperar numa estimativa preliminar. Esta constatação nos permite concluir que ainda não estamos numa região de ponto de ótimo cujo indicador mais marcante é a existência de uma curvatura pronunciada.

Antes de passarmos para a próxima fase é interessante ressaltar que pela Temperatura Ambiente ser uma variável não controlada, procuramos fazer com que suas variações ocorressem dentro da menor faixa e o mais aleatoriamente possível, para que sua influência sobre a variável resposta também o fosse. Com este cuidado procuramos fazer com que o não controle desta variável colaborasse apenas para o aumento do resíduo e não para a formação de tendências. A FIGURA 14 mostra os valores obtidos para a Temperatura Ambiente em função dos valores lidos da variável resposta. Verificamos uma distribuição razoavelmente aleatória, onde os

pontos encontram-se mais concentrados do lado esquerdo do gráfico, mas, no entanto, sem que se configure tendência alguma.

FIGURA 13 – Valores das variâncias em função das respectivas fontes de variabilidade.

FIGURA 14 - Valores medidos da Temperatura Ambiente em função da Capacidade Frigorífica na Fase I.

FIGURA 15 – Superfície de Resposta obtida na Fase I com a variável x_2 em seu nível inferior.

FIGURA 16 - Superfície de Resposta obtida na Fase I com a variável x_2 em seu nível superior.

6.2 - Fase 2: Procura pela Região do Ponto Estacionário

Um método considerado bastante efetivo e eficiente, por BOX & DRAPER (1987) nesta fase preliminar em que se está a procura da região de ótimo, é o “Steepest Ascent”. O método trabalha com os efeitos principais das variáveis independentes para determinar a direção através da qual devemos seguir para encontrar a região de ótimo, ou estacionária. Utilizando os resultados obtidos na Fase 1, determinamos a direção do vetor gradiente a partir do ponto central do planejamento fatorial. Esta direção tem a propriedade de atribuir as maiores variações à variável resposta na medida em que caminharmos sobre ela. Obtendo os valores dos efeitos principais de x_1 e x_3 , através da TABELA 11, temos respectivamente 68,1 e 435,9. A razão entre estes dois efeitos principais define a relação $(435,9 / 68,1) = 6,4$ com base na qual foram atribuídos incrementos à x_1 e x_3 , ou seja, $(\Delta x_3 / \Delta x_1) = 6,4$. A variável x_2 não foi envolvida devido à insignificância do seu efeito principal. A amplitude dos incrementos foi algo limitado, no que se refere à variável x_1 (Diâmetro Interno do Capilar), pois suas medidas tiveram que ficar restritas a certos valores disponíveis no mercado. Seguindo a relação definida para os incrementos e limitando-se aos valores disponíveis para x_1 , estabelecemos um conjunto de ensaios que pode ser visualizado na FIGURA 17. Nela podemos ver uma seta pontilhada representando o vetor gradiente em torno do qual foram executados os ensaios, representados pelos pontos claros. Como não foi possível executarmos os ensaios exatamente sobre a direção indicada pelo vetor, optamos pela estratégia de posicionar os experimentos em duas linhas paralelas envolvendo o gradiente e utilizando as medidas disponíveis de x_1 . Os pontos escuros revelam o posicionamento dos ensaios relativos ao planejamento da Fase 1. O comprimento do tubo capilar usado para os experimentos desta fase foi o mesmo adotado para o ponto central da fase anterior, ou seja, 1,50 metros. Os resultados obtidos nesta fase estão relacionados na TABELA 12, onde temos os níveis adotados para as variáveis independentes na forma codificada e natural além dos respectivos valores das Capacidades Frigoríficas. Para uma melhor visualização dos resultados podemos verifica-los graficamente através da FIGURA 18, onde podemos ver a evolução da Capacidade Frigorífica em função dos valores atribuídos a x_1 e x_3 .

FIGURA 17 – Níveis das variáveis ao longo do desenvolvimento dos ensaios. Os pontos escuros são relativos ao planejamento da Fase 1 e os pontos claros são relativos à Fase 2. A seta pontilhada indica a direção que proporciona os maiores incrementos na Capacidade Frigorífica.

Ainda na FIGURA 18 constatamos que as duas linhas denotam um formato típico de uma região de máximo em que àquela relativa à $x_1 = 0$ (linha azul) adquire resultados superiores aos obtidos pela $x_1 = 1$ (linha vermelha), indicando que o ponto de máximo se encontra próximo da primeira delas. Portanto, consideramos os níveis $x_1 = 0$ e $x_3 = 4$ os que mais se aproximam do ponto de máximo apresentado na figura.

TABELA 12 – Valores dos níveis adotados (codificados e naturais) e resultados da variável resposta (capacidade frigorífica) para os ensaios da Fase 2.

Nro do Ensaio	x_1	x_2	x_3	[mm] D	[m] C	[g] G	[W] Qe
12	0	0	1	1,35	1,50	150,0	664,0
13	1	0	1	1,63	1,50	150,0	814,1
14	0	0	2	1,35	1,50	187,5	944,7
15	1	0	2	1,63	1,50	187,5	951,6
16	0	0	3	1,35	1,50	225,0	1058,9
17	1	0	3	1,63	1,50	225,0	958,7
18	0	0	4	1,35	1,50	262,5	1166,7
19	1	0	4	1,63	1,50	262,5	921,2
20	0	0	5	1,35	1,50	300,0	1065,9
21	1	0	5	1,63	1,50	300,0	773,3
22	0	0	6	1,35	1,50	337,5	890,7
23	1	0	6	1,63	1,50	337,5	508,8

FIGURA 18 – Resultados obtidos pelos ensaios feitos após a Fase 1 estipulado nos níveis codificados.

6.3 - Fase 3: Exploração da Região do Ponto Estacionário

Tendo em vista o caráter exploratório desta Fase 3 empregamos um planejamento composto central com uma réplica para o ponto central, bastante adequado para este propósito. Procurando obter uma boa estimativa do erro experimental, efetuamos uma réplica completa do planejamento perfazendo um total de 32 ensaios. Oportunamente, escolhemos um novo sistema de coordenadas para as variáveis codificadas, coincidindo o ponto central do planejamento com os níveis indicados para o ponto de ótimo.

A etapa anterior nos indicou o posicionamento da região do ponto de máximo, cujos níveis estabelecidos para tal foram $x_1=0$ e $x_3=4$. Ressaltando a forma natural da variáveis, temos que $x_1=0$ corresponde ao Diâmetro Interno do Tubo Capilar igual a 1,35mm e $x_3=4$ corresponde à uma Carga de Refrigerante igual a 262,5g. O nível de x_2 ficou inalterado e igual a zero (correspondente ao Comprimento do Tubo Capilar=1,5m) para todos os ensaios realizados na fase anterior. Devido à insignificância do efeito principal desta variável resolvemos, à título de especulação, atribuir-lhe o valor de 2,5m como ponto central nesta fase. Portanto, o ponto central do planejamento desenvolvido nesta fase utilizará os valores de $D = 1,35\text{mm}$, $C = 2,5\text{m}$ e $G = 262,5\text{g}$.

O planejamento elaborado juntamente com os resultados das diversas variáveis resposta, calculados com base nos dados da TABELA 8 e TABELA 9, podem ser vistos na TABELA 13. A primeira variável resposta é Q_e (Capacidade Frigorífica) obtida conforme mencionado na seção 6.1. A segunda é o $CoEf$ (Coeficiente de Eficácia) calculado pela razão entre Q_e e Pot (Potência Consumida pelo Compressor), sendo que esta última foi determinada pela sua leitura direta no equipamento de medição. A terceira variável resposta é o Saq (Super Aquecimento), que, por definição, é igual a diferença entre a temperatura do refrigerante na linha de sucção (T_{suc} = Temperatura de Sucção) e a temperatura de saturação determinada com base na sua respectiva pressão. Com isso foi necessário determinar-se o valor da temperatura de saturação, a qual é mais uma das variáveis resposta (T_{evap}), através da pressão de evaporação medida diretamente no manômetro. A variável resposta seguinte é a T_{desc} (Temperatura de Descarga), medida diretamente no equipamento de medição. A próxima variável resposta é o

Sub (Sub Resfriamento) determinada, por definição, pela diferença entre a temperatura de saturação, calculada com base na pressão da linha de líquido, e a temperatura do refrigerante na entrada do elemento de expansão ($T_{sub} = \text{Temperatura do Sub Resfriado}$). De modo que a temperatura de saturação, que constitui-se em mais uma variável resposta (T_{cond}), é calculada a partir da pressão de condensação (P_{cond}) medida diretamente no manômetro. A Vaz (Vazão de Refrigerante) foi outra variável resposta abordada neste trabalho, e sua determinação é feita indiretamente com base em algumas das variáveis anteriores através da EQUAÇÃO 22.

$$Vaz = 1000.Q_e / (h_s - h_e) \quad (22)$$

Onde :

Vaz = vazão de refrigerante [g/s]

Q_e = Capacidade Frigorífica [W]

h_s = entalpia na saída do evaporador (J/kg)

h_e = entalpia na entrada do evaporador (J/kg)

O cálculo aqui desenvolvido é baseado na consideração de que a expansão ocorrida no tubo capilar é isoentálpica. Isto faz com que a entalpia seja a mesma desde a entrada até a saída do capilar, que corresponde também à entrada do evaporador. Portanto, a entalpia do refrigerante na entrada do capilar é considerada igual a da entrada do evaporador. Como a temperatura ($T_{sub} = \text{Temperatura do Sub Resfriado}$) e pressão ($P_{cond} = \text{Pressão de Condensação}$) do refrigerante na entrada do capilar são conhecidas, podemos determinar sua entalpia e atribuir este valor para a condição de entrada no evaporador. E como o refrigerante na saída do evaporador encontra-se super aquecido e sua temperatura ($T_{suc} = \text{Temperatura de Sucção}$) e pressão ($P_{evap} = \text{Pressão de Evaporação}$) são conhecidas, podemos determinar sua entalpia. A determinação propriamente dita dos valores da entalpia se deram mediante consulta das tabelas de propriedades termodinâmicas publicadas pela ASHRAE (1981).

Conforme mencionado inicialmente a Capacidade Frigorífica foi a variável resposta de importância primordial na busca pela região de seu ponto estacionário. Depois que seu posicionamento foi determinado analisamos as outras variáveis resposta, visando encontrar a melhor condição de funcionamento para o equipamento.

As novas relações entre as variáveis independentes na forma codificada e natural, válidas nesta fase, são descritas pelas EQUAÇÕES 23, 24 e 25.

$$x_1 = \frac{(D - 1,35)}{0,28} \quad (23)$$

$$x_2 = \frac{(C - 2,50)}{0,5} \quad (24)$$

$$x_3 = \frac{(G - 262,5)}{50} \quad (25)$$

TABELA 13 – Planejamento elaborado com os valores das oito variáveis resposta.

Ensaio Nro	Planejamento			VARIÁVEIS RESPOSTA							
	x_1	x_2	x_3	[W] Qe	CoEf	[°C] Saq	[°C] Tdesc	[°C] Sub	[g/s] Vaz	[°C] Tevap	[°C] Tcond
24	-1	-1	-1	738,6	1,30	32,1	97,1	12,4	4,3	-15,0	52,9
25	1	-1	-1	911,1	1,14	13,0	98,2	13,9	5,8	-0,1	61,1
26	-1	1	-1	628,8	1,23	36,5	88,2	12,3	3,5	-19,8	47,4
27	1	1	-1	969,5	1,29	17,4	99,1	13,5	6,1	-3,2	60,4
28	-1	-1	1	1074,6	1,23	5,9	104,0	25,0	7,1	1,2	72,7
29	1	-1	1	767,0	0,88	4,0	79,6	15,3	5,3	2,4	66,9
30	-1	1	1	1086,5	1,43	19,5	108,4	27,7	6,5	-4,6	69,0
31	1	1	1	834,2	0,96	5,2	82,0	15,0	5,8	2,2	67,6
32	0	0	0	1091,8	1,27	6,1	98,8	15,6	7,6	1,2	68,8
33	0	0	0	1102,7	1,30	4,5	95,1	16,0	7,5	1,2	66,9
34	0	0	1,68	875,8	0,98	2,8	89,8	17,9	6,3	2,4	72,7
35	0	0	-1,68	868,5	1,26	24,3	100,7	12,5	5,4	-7,6	59,7
36	0	1,68	0	1175,1	1,40	4,3	102,5	17,3	8,0	0,3	67,6
37	0	-1,68	0	1064,1	1,25	3,5	90,6	16,3	7,3	1,2	67,0
38	1,68	0	0	833,4	0,97	3,3	81,3	15,7	5,7	2,4	65,4
39	-1,68	0	0	552,6	1,15	39,5	89,1	17,2	3,0	-23,0	48,2
40	-1	-1	-1	832,4	1,34	28,2	95,0	13,4	5,0	-12,0	55,8
41	1	-1	-1	1000,5	1,20	5,3	97,7	14,8	6,7	1,6	63,5
42	-1	1	-1	769,4	1,40	33,5	95,7	13,7	4,4	-16,9	51,3
43	1	1	-1	1053,4	1,30	13,8	101,1	15,1	6,8	-0,5	64,3
44	-1	-1	1	1159,9	1,36	10,9	114,3	23,6	7,5	0,1	71,6
45	1	-1	1	730,4	0,83	2,1	83,2	16,2	5,0	2,8	67,0
46	-1	1	1	936,3	1,30	21,1	107,2	25,3	5,6	-7,1	66,9
47	1	1	1	838,8	0,95	2,4	85,9	16,4	5,8	2,4	68,2
48	0	0	0	1182,4	1,41	3,5	96,3	17,1	8,0	0,8	66,9
49	0	0	0	1135,2	1,34	4,3	96,5	16,9	7,7	0,8	67,0
50	0	0	1,68	836,0	0,95	4,4	85,9	16,8	6,0	2,4	72,1
51	0	0	-1,68	905,8	1,42	23,9	92,6	12,7	5,4	-10,0	53,2
52	0	1,68	0	1198,4	1,44	6,5	102,6	17,2	8,0	0,1	66,9
53	0	-1,68	0	1013,8	1,17	3,4	95,2	16,6	7,1	2,0	69,9
54	1,68	0	0	743,6	0,85	4,0	86,1	14,3	5,2	2,8	66,9
55	-1,68	0	0	543,1	1,09	39,0	97,4	17,9	3,0	-20,5	52,1

Aqui novamente analisamos os valores da variável não controlada, Temperatura Ambiente, que podem ser vistos na FIGURA 19. Os pontos levantados em função do valor medido da variável resposta Capacidade Frigorífica mostram-se aleatoriamente distribuídos, fazendo com que sua influência sobre o resíduo ocorra da mesma forma.

FIGURA 19 – Valores da Temperatura Ambiente obtidos para os ensaios, em função dos valores lidos para a Capacidade Frigorífica.

6.3.1 - Análise da Capacidade de Refrigeração

A Análise de Variância feita para a Capacidade de Refrigeração com base no planejamento composto central, pode ser observada na TABELA 14. Na coluna da esquerda temos as Fontes de Variabilidade com os termos independentes lineares, quadráticos, interações e erros. Os termos considerados significativos (nível de significância inferior a 5%) estão indicados na tabela e suas variâncias estão colocadas graficamente em ordem de grandeza na FIGURA 20. O termo predominante é o quadrático relativo à x_1 seguido pela interação $x_1.x_3$, demonstrando que o Diâmetro Interno do Capilar (x_1) exerce uma influência predominante na a Capacidade Frigorífica. O terceiro mais influente, é o termo quadrático de x_3 (Carga de Refrigerante) e por fim os termos de interação $x_1.x_2$ e o linear de x_1 . Considerando os três primeiros termos, dependentes exclusivamente de x_1 e x_3 , podemos dizer que eles são responsáveis por 82% da variabilidade total.

TABELA 14 – Análise de Variância dos resultados obtidos para Capacidade Frigorífica na Fase 3.

Fontes de Variabilidade	S.Q.	G.L.	Q.M.	F	P	Efeitos
Interseção		1				1125,50
x_1 (Linear)	17311,0	1	17311,0	6,0	0,026	✓ 50,35
x_1 (Quadrático)	453514,1	1	453514,1	155,9	5,5E-10	✓ -312,90
x_2 (Linear)	5843,4	1	5843,4	2,0	0,17	29,25
x_2 (Quadrático)	10,7	1	10,7	0,0	0,95	1,52
x_3 (Linear)	6420,6	1	6420,6	2,2	0,16	30,66
x_3 (Quadrático)	132507,9	1	132507,9	45,6	3,4E-06	✓ -169,14
$x_1.x_2$	28151,3	1	28151,3	9,7	0,006	✓ 83,89
$x_1.x_3$	263241,9	1	263241,9	90,5	3,2E-08	✓ -256,54
$x_2.x_3$	40,4	1	40,4	0,0	0,91	3,18
Falta de Ajuste	74874,3	5	14974,9	5,1	4,7E-03	3,18
Erro Puro	49449,6	17	2908,8			
Total	1035280,0	32				

Desta forma podemos dizer que a Capacidade Frigorífica do sistema, dentro dos limites estabelecidos, depende intimamente do Diâmetro Interno do Capilar e da Carga de Refrigerante. Os efeitos quadráticos mostram-se bastante pronunciados demonstrando a predominância da curvatura, conforme é esperado para uma região de ótimo, e a qual podemos considerar como indicador marcante da região de um ponto estacionário.

FIGURA 20 – Valor de variâncias em função das respectivas fontes de variabilidade com relação à Capacidade Frigorífica.

Atentando agora para um ajuste polinomial dos dados levantados, lançamos mão de um modelo quadrático tendo em vista a forte presença da curvatura. A EQUAÇÃO 26 apresenta um polinômio completo de segunda ordem para três variáveis.

$$\hat{y} = \beta_0 + \beta_1.x_1 + \beta_2.x_2 + \beta_3.x_3 + \beta_{12}.x_1.x_2 + \beta_{13}.x_1.x_3 + \beta_{23}.x_2.x_3 + \beta_{11}.x_1^2 + \beta_{22}.x_2^2 + \beta_{33}.x_3^2 \quad (26)$$

Os coeficientes do polinômio são obtidos na TABELA 14 simplesmente dividindo-se os valores dos efeitos (localizados na última coluna da direita) por dois, referente aos dois níveis que são levados em conta no cálculo dos efeitos. Desta forma obtivemos a EQUAÇÃO 27.

$$\hat{y} = 1125,50 + 25,18.x_1 + 14,63.x_2 + 15,33.x_3 + 41,95.x_1.x_2 - 128,27.x_1.x_3 + 1,59.x_2.x_3 - 156,45.x_1^2 + 0,76.x_2^2 - 84,57.x_3^2 \quad (27)$$

O resíduo obtido com o modelo da EQUAÇÃO 27 pode ser visto na FIGURA 25, onde a distribuição dos pontos mostra-se aleatoriamente distribuída com dispersão constante e centrada no zero. A TABELA 15 mostra os valores da análise de variância feita para o ajuste considerando o modelo da EQUAÇÃO 27, onde verificamos que a variabilidade explicada é de 88% e é 34 vezes maior que o erro puro com uma significância igual a $1,8E-6$. O erro puro estima o erro experimental e o erro por falta de ajuste está ligado ao desvio entre os dados levantados e o polinômio ajustado. Este último pode ser reduzido na medida em que se for sofisticando o modelo matemático usado para o ajuste.

TABELA 15 – Análise de Variância do ajuste feito com o modelo completo.

Fonte de Variabilidade	S.Q.	G.L.	Q.M.	F	P
Modelo	910956,1	6	151826,0	34,0	1,8E-06
Falta de Ajuste	75205,1	15	5013,7	1,1	0,43
Erro Puro	49118,7	11	4465,3		
Total	1035280,0	32			

$R^2 = 0,880$
 $R = 0,938$
 Desvio Padrão do Erro Total = 69,1 W

Entretanto, se considerarmos um modelo apenas com os termos mais significativos (indicados na TABELA 14), teremos,

$$\hat{Y} = 1126,69 + 25,18.x_1 + 41,95.x_1.x_2 - 128,27.x_1.x_3 - 156,77.x_1^2 - 84,89.x_3^2 \quad (28)$$

A TABELA 16 mostra a análise de variância do ajuste considerando o modelo simplificado, descrito na EQUAÇÃO 28, o qual explica 86,8% da variância, mantendo praticamente o mesmo valor alcançado pelo modelo completo. Observando o resíduo produzido pelo modelo simplificado, apresentado na FIGURA 26, verificamos uma distribuição bastante satisfatória demonstrando que a simplificação praticamente não incorre em nenhum prejuízo para o ajuste. Analisando o desvio padrão constatamos que ele passou de 69,1W, obtido com o modelo completo, para 72,5W no modelo simplificado, uma diferença de aproximadamente 5%.

TABELA 16 - Análise de Variância do ajuste feito com o modelo simplificado.

Fonte de Variabilidade	S.Q.	G.L.	Q.M.	F	P
Modelo	898641,0	6	149773,5	51,8	5,4E-10
Falta de Ajuste	87520,2	9	9724,5	3,4	0,02
Erro Puro	49118,7	17	2889,3		
Total	1035280,0	32			

$R^2 = 0,868$
 $R = 0,932$
 Desvio Padrão do Erro Total = 72,5 W

Adotamos o modelo simplificado para as avaliações feitas sobre a Capacidade Frigorífica do equipamento. Embora o resíduo já tenha sido preliminarmente analisado, consideramos importante uma verificação mais extensa que confirme suas características, como ser independente e identicamente distribuído, seguir uma distribuição normal, ter média nula e desvio padrão constante. A FIGURA 27 revela a distribuição de frequências do resíduo em contraste com a normal (linha vermelha), a partir da qual podemos constatar uma razoável concordância, ou seja, os pontos do resíduo assumem uma distribuição bem próxima de uma distribuição normal. Outra forma de avaliarmos o resíduo é levantando o gráfico dos seus valores normalizados conforme FIGURA 28, onde quanto mais os pontos mantiverem-se sobre a linha vermelha, mais estarão assumindo uma distribuição normal. Uma avaliação quantitativa do resíduo pode ser feita pelo teste de normalidade de Kolmogorov – Smirnov, que afirma que a distribuição é normal com uma significância de 7,4%. Concluímos então que o resíduo assume as características desejadas, as quais são a base para toda e qualquer análise relacionada ao modelo matemático desenvolvido.

Partindo agora para a análise do sistema frigorífico com base no modelo empírico levantado, iniciamos levantando a Superfície de Resposta da Capacidade Frigorífica em função das variáveis independentes. Para tanto, torna-se interessante trabalharmos com as variáveis na forma natural, para isso substituímos as EQUAÇÕES 23, 24 e 25 na EQUAÇÃO 28 e obtivemos a EQUAÇÃO 29.

$$\begin{aligned}
\hat{y} = & 1126,69 + 25,18 \left(\frac{D-1,35}{0,279} \right) + 41,95 \left(\frac{D-1,35}{0,279} \right) \left(\frac{C-2,5}{0,5} \right) + \\
& -128,27 \left(\frac{D-1,35}{0,279} \right) \left(\frac{G-262,5}{50} \right) - 156,77 \left(\frac{D-1,35}{0,279} \right)^2 + \\
& - 84,89 \left(\frac{G-262,5}{50} \right)^2
\end{aligned} \tag{29}$$

Levantando a Superfície de Resposta, com base na EQUAÇÃO 29 obtivemos a FIGURA 29. Nela podemos identificar oito regiões coloridas em função do nível atingido pela variável resposta, cujo valor máximo atingido em cada uma delas pode ser verificado na legenda. A FIGURA 29 projetada no plano sob a forma de Curvas de Nível, resulta na FIGURA 30, na qual verificamos 9 pontos brancos determinando as posições onde foram realizados os ensaios. Das três variáveis independentes selecionamos as duas mais significativas, perante a resposta estudada, para serem colocadas nos eixos dos gráficos, de modo que a terceira é mantida constante. Observando o formato de região de máximo, notamos que para se manter dentro dela a Carga de Refrigerante e o Diâmetro Interno do Capilar devem oscilar de forma inversa, ou seja, o aumento de um deve ser acompanhado pela redução do outro. Entretanto, esta relação deve-se manter dentro dos limites da região delimitada na figura. Quando variamos ambas as variáveis no mesmo sentido há uma propensão a se sair da região de máximo, o que pode ser visto claramente na FIGURA 30. Ou seja, variações inversas propiciam menores variações na variável resposta do que variações no mesmo sentido, seja de incremento ou redução.

A superfície de resposta apresentada pela FIGURA 31 juntamente com a FIGURA 32, revelam o comportamento do Comprimento e do Diâmetro Interno do Tubo Capilar perante a variável resposta. Nota-se que a Capacidade Frigorífica mantém-se praticamente constante ao longo de variações do Comprimento do Tubo, que se mostra pouco influente.

6.3.1.1- Determinação do Ponto Estacionário.

A determinação do ponto estacionário, foi feita através do modelo da EQUAÇÃO 9. Lançamos mão do cálculo das derivadas parciais do polinômio ajustado em relação às suas variáveis independentes igualando-as a zero. Espera-se uma certa vulnerabilidade deste procedimento devido à uma ampliação do erro na determinação das derivadas parciais. A título comparativo fizemos este cálculo para o modelo matemático completo (EQUAÇÃO 8) e para o simplificado (EQUAÇÃO 9) no intuito de verificar alguma discrepância nos resultados.

TABELA 17 – Coordenadas do ponto estacionário obtidas para a Capacidade Frigorífica em função do modelo matemático.

Modelo	Variáveis Independentes						Variável Reposta
	Codificadas			Naturais			Capacidade Frigorífica
	x_1	x_2	x_3	[mm] D	[m] C	[g] G	[W] Qe
Completo	-0,3	-1,9	0,3	1,27	1,56	277,2	1110,4
Simplificado	0	-0,6	0	1,35	2,20	262,5	1126,7

Analizando a TABELA 17 verificamos que as diferenças entre os resultados obtidos para o Diâmetro Interno do Capilar (D) e a Carga de Refrigerante (G) são pequenas, principalmente se as avaliarmos perante a FIGURA 30 onde o posicionamento de ambos os resultados ocorre bem próximo ao centro da região em que verificamos os maiores resultados. Verificamos que como o Comprimento do Capilar não repercute significativamente na variável resposta, a relativa discrepância entre os resultados obtidos não se trata de uma surpresa. Em suma podemos dizer que é um tanto quanto teórico falar em ponto estacionário, o que temos na realidade são regiões delimitadas em função do erro experimental envolvido.

6.3.1.2 - Análise Canônica.

Após determinarmos o ponto estacionário torna-se interessante uma caracterização do tipo de superfície obtida, levando em conta as três variáveis simultaneamente, através da Análise Canônica. No presente trabalho temos o limite máximo de variáveis que ainda nos permite uma avaliação gráfica da superfície. Iniciamos por colocar o modelo da EQUAÇÃO 28 na forma matricial conforme a EQUAÇÃO 30.

$$\hat{y} = \hat{\beta}_0 + x'b + x'Bx \quad (30)$$

$$\hat{\beta}_0 = 1126,69 \quad x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} \quad b = \begin{bmatrix} 25,18 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} -156,77 & 20,98 & -64,14 \\ 20,98 & 0 & 0 \\ -64,14 & 0 & -84,89 \end{bmatrix}$$

A partir deste modelo na forma matricial determinamos os auto valores e auto vetores da matriz B , os quais determinaram as direções dos eixos principais da superfície na forma Canônica.

TABELA 18 – Auto valores e seus respectivos auto vetores relativos à matriz B .

Auto Valor	Auto Vetor		
$\lambda_1 = 3,85$	0,18	0,98	-0,13
$\lambda_2 = -49,48$	0,47	-0,20	-0,86
$\lambda_3 = -196,03$	0,86	-0,092	0,50

A transformação feita para o novo sistema de eixos define novas coordenadas w_1 , w_2 , w_3 as quais podem ser determinadas a partir de x_1 , x_2 , x_3 segundo a EQUAÇÃO 31.

$$\begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ w_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,18 & 0,98 & -0,13 \\ 0,47 & -0,20 & -0,86 \\ 0,86 & -0,092 & 0,50 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 - 0 \\ x_2 + 0,6 \\ x_3 - 0 \end{bmatrix} \quad (31)$$

Desta forma obtivemos a forma canônica do modelo representada pela EQUAÇÃO 32, onde w_1 , w_2 , w_3 são as variáveis independentes segundo o novo sistema de coordenadas, e seus coeficientes são os próprios auto valores anteriormente determinados.

$$\hat{y} = 1126,7 + 3,85w_1^2 - 49,48w_2^2 - 196,03w_3^2 \quad (32)$$

A natureza da superfície de resposta é descrita pela magnitude e pelo sinal dos coeficientes do polinômio. Observando os coeficientes, constatamos que os dois de maior magnitude são negativos e o menor positivo. Esta combinação, conforme BOX & DRAPER (1987), define uma superfície com o formato descrito pela FIGURA 21, sendo que na origem temos o ponto estacionário. A magnitude dos coeficientes revela também a sensibilidade da resposta referente a variações segundo aquele eixo. Por exemplo, variações no eixo w_3 são mais sensíveis do que no eixo w_1 . Como os coeficientes do polinômio segundo os eixos w_2 e w_3 são negativos, coordenadas diferentes de zero contribuirão sempre para uma redução da resposta. Por outro lado, sendo o coeficiente em relação ao eixo w_1 positivo, teremos sempre incrementos na resposta. Entretanto, devido à pequena magnitude do coeficiente tais incrementos são muito pouco significativos.

FIGURA 21 – Superfície gerada pelo polinômio na forma canônica.

Fazendo cortes na superfície da FIGURA 21 orientados pelos eixos principais, obtivemos dois tipos básicos de resultados, superfícies em forma de morro e superfícies em forma de sela. Segundo os eixos w_1 e w_2 , em que os coeficientes tem sinais inversos, a forma resultante foi uma sela, a qual pode ser verificada na FIGURA 23. As linhas são definidas por níveis em que a variável resposta se mantém constante e cujos valores estão assinalados sobre cada uma delas. Um formato de sela também é obtido em relação aos eixos w_1 e w_3 , assumindo um formato achatado comparativamente à figura anterior. Tal fato ocorre devido à maior sensibilidade da variável resposta com relação à w_3 , proporcionado pelo alto valor do coeficiente do polinômio na forma canônica em relação à este eixo. Avaliando agora o resultado obtido em relação aos eixos w_2 e w_3 verificamos uma superfície em forma de morro. A FIGURA 24 apresenta cortes em nível desta superfície, os quais se revelam em formatos elípticos centralizadas sendo que sua maior extensão é observada ao longo de w_2 .

FIGURA 22 - Curvas obtidas para valores constantes da variável resposta e para $w_2 = 0$.

FIGURA 23 - Curvas obtidas para valores constantes da variável resposta e para $w_3 = 0$.

FIGURA 24 - Curvas obtidas para valores constantes da variável resposta e para $w_1 = 0$.

Fazendo algumas especulações na superfície gerada pelo polinômio na forma canônica pudemos estabelecer alguns resultados interessantes. Através da TABELA 19 podemos conferir, na coluna da esquerda, coordenadas ao longo de w_1 enquanto w_2 e w_3 são mantidas iguais a zero. Os valores das variáveis na forma codificada (x_1, x_2, x_3) e natural (D, C, G) assim como a variável resposta Qe, também são apresentados. Caminhando ao longo do eixo w_1 podemos constatar que a variável resposta configura uma curva de mínimo suave proporcionando alterações pouco significativas. Observando as colunas das variáveis naturais verificamos que

caminharmos sobre o w_1 corresponde a variarmos o Diâmetro Interno do Capilar de forma direta com seu Comprimento e inversa com a Carga de Refrigerante.

TABELA 19 – Valores obtidos ao caminharmos ao longo do eixo w_1 .

$w_2 = 0$ $w_3 = 0$	Variáveis Codificadas			Variáveis Naturais			Variável Resposta
w_1	x_1	x_2	x_3	[mm] D	[m] C	[g] G	[W] Qe
-2	-0,36	-2,55	0,26	1,25	1,22	275,4	1142,1
-1	-0,18	-1,58	0,13	1,30	1,71	269,0	1130,6
0	0,00	-0,60	0,00	1,35	2,20	262,5	1126,7
1	0,18	0,38	-0,13	1,40	2,69	256,0	1130,6
2	0,36	1,35	-0,26	1,45	3,18	249,6	1142,1

O eixo w_2 é motivo de interesse, pois sobre ele grandes variações são toleráveis sem que a variável resposta seja drasticamente reduzida. Acompanhando os valores na TABELA 20 verificamos que a variável resposta assume uma curva de máximo ao longo de w_2 . Para isso o Diâmetro Interno do Capilar deve variar de forma inversa com o seu Comprimento e com a Carga de Refrigerante, conforme podemos acompanhar pela tabela. Este detalhe também pode ser constatado através da FIGURA 30. O maior coeficiente do polinômio na forma canônica é relativo ao eixo w_3 , fazendo com que variações sobre ele proporcionem grandes alterações na variável resposta. Este fato nos faz atentar para os limites dentro do qual podemos nos manter para que a variável resposta não sofra reduções drásticas. Através da TABELA 21 verificamos que valores entre -1 e +1 sobre o eixo w_3 mantém a variável resposta sempre superior a 930W. Esta faixa estabelece os respectivos valores para as variáveis na forma natural, os quais nos interessam em termos práticos. Constatamos também que, para caminharmos sobre w_3 o Diâmetro Interno do Capilar deve variar inversamente com o seu Comprimento e diretamente com a Carga de Refrigerante.

TABELA 20 - Valores obtidos ao caminhar ao longo do eixo w_2 .

$w_1 = 0$ $w_3 = 0$	Variáveis Codificadas			Variáveis Naturais			Variável Resposta
w_2	x_1	x_2	x_3	[mm] D	[m] C	[g] G	[W] Qe
-2	-0,95	-0,20	1,72	1,08	2,40	348,3	928,8
-1	-0,47	-0,40	0,86	1,22	2,30	305,4	1077,2
0	0,00	-0,60	0,00	1,35	2,20	262,5	1126,7
1	0,47	-0,80	-0,86	1,48	2,10	219,6	1077,2
2	0,95	-1,00	-1,72	1,62	2,00	176,7	928,8

TABELA 21 - Valores obtidos ao caminhar ao longo do eixo w_3 .

$w_1 = 0$ $w_2 = 0$	Variáveis Codificadas			Variáveis Naturais			Variável Resposta
w_3	x_1	x_2	x_3	[mm] D	[m] C	[g] G	[W] Qe
-2	-1,72	-0,42	-1,00	0,87	2,29	212,7	342,6
-1	-0,86	-0,51	-0,50	1,11	2,25	237,6	930,7
0	0,00	-0,60	0,00	1,35	2,20	262,5	1126,7
1	0,86	-0,69	0,50	1,59	2,15	287,4	930,7
2	1,72	-0,78	1,00	1,83	2,11	312,3	342,6

FIGURA 25 - Resíduo obtido pelo ajuste para a Capacidade Frigorífica utilizando o modelo completo.

FIGURA 26 - Resíduo obtido pelo ajuste para Capacidade Frigorífica utilizando o modelo simplificado.

FIGURA 27 – Distribuição de frequências do resíduo do modelo simplificado ajustado para a Capacidade Frigorífica.

FIGURA 28 – Valores normalizados do resíduo obtido pelo ajuste da Capacidade Frigorífica utilizando o modelo simplificado.

FIGURA 29 – Superfície de Resposta levantada para a Capacidade Frigorífica na região do ponto estacionário, com o comprimento do capilar em seu nível intermediário.

FIGURA 30 – Curva de nível levantada para a Capacidade Frigorífica na região do ponto de máximo, com o comprimento do capilar em seu nível intermediário.

6.3.2 - Análise do Coeficiente de Eficácia

A partir dos dados levantados da TABELA 8 e TABELA 9, determinamos o Coeficiente de Eficácia do sistema frigorífico definido pela razão entre a Capacidade Frigorífica e a Potência Consumida pelo compressor. Os resultados estão na TABELA 13 em função dos ensaios definidos pelo planejamento. O estudo da Análise de Variância feito a partir destes resultados pode ser visto na TABELA 22. Observando os dados verificamos três fontes de variabilidade passíveis de serem desprezadas com base em seus altos níveis de significância, que são, o termo quadrático de x_2 e os termos de interação $x_1.x_2$ e $x_2.x_3$.

TABELA 22 – Análise de Variância dos resultados obtidos para o Coeficiente de Eficácia.

Fontes de Variabilidade	S.Q.	G.L.	Q.M.	F	P		Efeitos
Interseção							1,323
x_1 (Linear)	0,272	1	0,272	64,7	3,4E-07	✓	-0,200
x_1 (Quadrático)	0,184	1	0,184	43,8	4,4E-06	✓	-0,200
x_2 (Linear)	0,063	1	0,063	14,9	0,0012	✓	0,096
x_2 (Quadrático)	0,001	1	0,001	0,2	0,69		0,012
x_3 (Linear)	0,230	1	0,230	54,6	1,1E-06	✓	-0,184
x_3 (Quadrático)	0,049	1	0,049	11,6	0,0033	✓	-0,103
$x_1.x_2$	0,006	1	0,006	1,5	0,24		0,040
$x_1.x_3$	0,114	1	0,114	27,1	7,2E-05	✓	-0,169
$x_2.x_3$	0,001	1	0,001	0,1	0,72		0,012
Falta de Ajuste	0,055	5	0,011	2,6	0,062		
Erro Puro	0,072	17	0,004				
Total	1,064	32					

As variabilidades relacionadas aos efeitos mais representativos (nível de significância inferior a 5%) estão colocadas graficamente em ordem decrescente na FIGURA 33.

Os termos lineares de x_1 e x_3 predominam, seguidos pelo termo quadrático de x_1 e o de interação $x_1.x_3$. Eles se responsabilizam por 75% da variabilidade, permitindo-nos concluir que estas duas variáveis praticamente comandam o comportamento do Coeficiente de Eficácia. Os dois termos que contribuem com as menores variabilidades são o linear de x_2 e o quadrático de x_3 .

FIGURA 33 - Valor das variâncias em função das respectivas fontes de variabilidade com relação ao Coeficiente de Eficácia.

Ajustando o modelo da EQUAÇÃO 26, e substituindo as equações que relacionam as variáveis na forma natural e codificada (EQUAÇÕES 23, 24 e 25), obtivemos a EQUAÇÃO 33, com os termos não significativos já descartados.

$$\begin{aligned}
 \hat{y} = & 1,333 - 0,0999 \left(\frac{D - 1,35}{0,279} \right) + 0,0480 \left(\frac{C - 2,50}{0,5} \right) - 0,0918 \left(\frac{G - 262,5}{50} \right) + \\
 & - 0,0845 \left(\frac{D - 1,35}{0,279} \right) \left(\frac{G - 262,5}{50} \right) - 0,102 \left(\frac{D - 1,35}{0,279} \right)^2 + \\
 & - 0,0541 \left(\frac{G - 262,5}{50} \right)^2
 \end{aligned} \quad (33)$$

Avaliando o ajuste feito, elaboramos uma Análise de Variância apresentada na TABELA 23, onde constatamos que o modelo explica 87,3% da variabilidade total (revelada pelo índice R^2) e o erro assume um desvio padrão igual a 0,073. Podemos verificar também os valores da variabilidade do erro sub dividida em erro puro e erro por falta de ajuste. Estes resultados puderam ser desenvolvidos

devido ao bom comportamento do resíduo, conforme veremos a seguir, validando o modelo proposto e as estatísticas utilizadas.

TABELA 23 – Análise de Variância do modelo ajustado para o Coeficiente de Eficácia.

Fonte de Variabilidade	S.Q.	G.L.	Q.M.	F	P
Modelo	0,929	7	0,1328	31,7	1,5E-08
Falta de Ajuste	0,063	8	0,0079	1,9	0,13
Erro Puro	0,071	17	0,0042		
Total	1,064	32			

$R^2 = 0,873$
 $R = 0,934$
 Desvio Padrão do Erro Total = 0,073

A FIGURA 34 apresenta o resíduo obtido pelo modelo ajustado. Os pontos estão dispostos em função do valor estimado para o Coeficiente de Eficácia e mantiveram-se numa faixa constante de $\pm 0,14$ e centrados no zero. A normalidade do resíduo pode ser verificada pela sua distribuição de freqüências mostrada na FIGURA 35. Comparando os valores obtidos com a curva normal, representada pela linha em vermelho, testemunhamos uma razoável concordância. Este fato também pode ser constatado pela representação do resíduo normalizado na FIGURA 36, onde a proximidade dos pontos à linha vermelha (linha normal) demonstra sua normalidade. Fazendo uma última análise, desta vez quantitativa, verificamos que a distribuição é normal com uma significância de 12,4%, segundo o teste de normalidade de Kolmogorov – Smirnov.

Depois de verificada a adequabilidade do modelo pela aprovação do resíduo, partimos para uma análise do comportamento das variáveis em estudo. Para tanto iniciamos por levantar a Superfície de Resposta do Coeficiente de Eficácia conforme verifica-se na FIGURA 37. É importante ressaltar que esta superfície não corresponde a uma região em torno de um ponto estacionário equivalente à estabelecida para a Capacidade Frigorífica. O que podemos dizer é que ela revela o comportamento do Coeficiente de Eficácia na região do ponto estacionário determinada para a Capacidade Frigorífica, permitindo-nos avaliar as características mais interessantes. Portanto, a região em tonalidade mais escura revela onde o Coeficiente de Eficácia adquire seus maiores valores na região do ponto estacionário da Capacidade Frigorífica. Esta interpretação vale também para as demais variáveis resposta que serão avaliadas daqui para frente. A FIGURA 38 representa as Curvas

de Nível da Superfície de Resposta da FIGURA 37. Identifica-se facilmente a região onde o Coeficiente de Eficácia assume seus valores máximos, sendo que para manter-se ao longo da sua dimensão mais alongada é necessário que o Diâmetro Interno do Capilar e a Carga de Refrigerante variem de forma inversa respeitando os limites delineados na figura. Se a variação for direta caminharíamos sobre a sua menor dimensão provocando um estreitamento destes limites. Observa-se também que a região assume um formato semelhante ao obtido para Capacidade Frigorífica, com exceção do posicionamento, que se mostra um pouco deslocado para a esquerda e para baixo. A influência do Comprimento do Capilar pode ser verificada na FIGURA 39 e FIGURA 40, e mostra-se pouco significativa, conforme indicado pela Análise de Variância.

FIGURA 34 – Distribuição do resíduo do modelo ajustado para o Coeficiente de Eficácia em função do valor estimado.

FIGURA 35 – Distribuição de Frequência do resíduo do modelo ajustado para o Coeficiente de Eficácia.

FIGURA 36 – Valores normalizados do resíduo obtidos pelo modelo ajustado para o Coeficiente de Eficácia.

FIGURA 37 – Superfície de Resposta levantada para o Coeficiente de Eficácia considerando o comprimento do capilar em seu nível intermediário.

FIGURA 38 – Curva de Nível levantada para o Coeficiente de Eficácia considerando o comprimento do capilar em seu nível intermediário.

FIGURA 39 – Superfície de Resposta levantada para o Coeficiente de Eficácia considerando a carga de refrigerante em seu nível intermediário.

FIGURA 40 – Curva de Nível levantada para o Coeficiente de Eficácia considerando a carga de refrigerante em seu nível intermediário.

6.3.3 - Análise do Superaquecimento

A TABELA 24 traz os resultados da Análise de Variância feita para o Super Aquecimento a partir dos valores da TABELA 13.

TABELA 24 – Análise de Variância feita com o os dados obtidos para o Super Aquecimento.

Fontes de Variabilidade	S.Q.	G.L.	Q.M.	F	P	Efeitos
Interseção		1				4,42
x_1 (Linear)	2184,1	1	2184,1	492,1	5,5E-14	✓ -17,88
x_1 (Quadrático)	759,8	1	759,8	171,2	2,7E-10	✓ 12,81
x_2 (Linear)	108,6	1	108,6	24,5	1,2E-04	✓ 3,99
x_2 (Quadrático)	2,7	1	2,7	0,6	0,44	0,77
x_3 (Linear)	1155,5	1	1155,5	260,3	9,7E-12	✓ -13,01
x_3 (Quadrático)	255,9	1	255,9	57,7	7,4E-07	✓ 7,43
$x_1.x_2$	22,8	1	22,8	5,1	0,04	✓ -2,39
$x_1.x_3$	86,0	1	86,0	19,4	3,9E-04	✓ 4,64
$x_2.x_3$	0,5	1	0,5	0,1	0,75	0,34
Falta de Ajuste	157,9	5	31,6	7,1	9,3E-04	
Erro Puro	75,5	17	4,4			
Total	4742,7	32				

As fontes de variabilidade mais significativas, assinaladas na TABELA 24, são apresentadas graficamente na FIGURA 41. Os termos relativos aos efeitos principais de x_1 e x_3 explicam aproximadamente 92% da variabilidade da variável resposta, sendo que os lineares são os maiores, seguidos dos quadráticos. Portanto, podemos dizer que estas duas variáveis dominam o comportamento do Super Aquecimento. Observando o sinal dos efeitos dos termos quadráticos de x_1 e x_3 constatamos que eles são negativos configurando um ponto de mínimo.

A partir do polinômio geral definido pela EQUAÇÃO 26 foi feito um ajuste que determinou o modelo descrito pela EQUAÇÃO 34, considerando apenas os termos significativos. Avaliando o ajuste, efetuamos uma Análise de Variância apresentada na TABELA 25, onde verificamos que 95% da variabilidade é explicada pelo modelo proposto, com um desvio padrão igual a 3,1°C.

FIGURA 41 - Valor das variâncias em função das respectivas fontes de variabilidade com relação ao Super Aquecimento.

Ajustando o modelo da EQUAÇÃO 26 e substituindo as EQUAÇÕES 23, 24 E 25, obtivemos a EQUAÇÃO 34 considerando apenas os termos mais importantes pela Análise de Variância. Três gráficos foram levantados para avaliar o resíduo obtido pelo ajuste. O primeiro está na FIGURA 42 em que o resíduo é colocado em função dos valores estimados, o qual apresenta-se com uma distribuição razoavelmente aleatória, apesar de uma certa concentração de pontos do lado esquerdo.

$$\begin{aligned}
 \hat{y} = & 5,02 - 8,94 \cdot \left(\frac{D - 1,35}{0,279} \right) + 1,99 \cdot \left(\frac{C - 2,50}{0,5} \right) - 6,50 \cdot \left(\frac{G - 262,5}{50} \right) + \\
 & - 1,19 \cdot \left(\frac{D - 1,35}{0,279} \right) \cdot \left(\frac{C - 2,5}{0,5} \right) + 2,32 \cdot \left(\frac{D - 1,35}{0,279} \right) \cdot \left(\frac{G - 262,5}{50} \right) + \\
 & + 6,24 \cdot \left(\frac{D - 1,35}{0,279} \right)^2 + 3,55 \cdot \left(\frac{G - 262,5}{50} \right)^2
 \end{aligned} \quad (34)$$

A FIGURA 43 traz a distribuição de frequências do resíduo frente à curva normal esperada, revelando um bom comportamento. E finalmente a FIGURA 44 que apresenta o resíduo normalizado em contraste com a curva normal ideal

representada pela linha vermelha. Neste caso também constatamos um bom comportamento do resíduo apesar de uma pequena discrepância dos pontos do lado direito do gráfico. A TABELA 25 traz a Análise de Variância feita com os resultados obtidos para o ajuste. O desvio padrão do erro foi de 3,1°C e a explicação da variabilidade foi de 95%.

TABELA 25 – Análise de Variância do modelo ajustado para o Super Aquecimento.

Fontes de Variabilidade	S.Q.	G.L.	Q.M.	F	P
Modelo	4506,1	8	563,3	127,2	1,2E-13
Falta de Ajuste	161,3	7	23,0	5,2	0,0026
Erro Puro	75,3	17	4,4		
Total	4742,7	32			

$R^2 = 0,950$
 $R = 0,975$
 Desvio Padrão do Erro Total = 3,1 °C

A partir do modelo ajustado e validado pela análise do resíduo, construímos a Superfície de Resposta, apresentada na FIGURA 45, e também as Curvas de Nível, representadas na FIGURA 46. Nosso interesse em relação a esta variável resposta não está na região de mínimo estabelecida nas figuras e sim no primeiro anel formado ao seu redor. Queremos um nível para o Super Aquecimento que não seja pequeno a ponto de permitir o retorno de líquido para o compressor. Mas que também não seja grande a ponto de reduzir a Capacidade Frigorífica do equipamento e aumentar a Temperatura de Descarga do refrigerante a níveis indesejáveis. Estes cuidados são medidas de proteção para o equipamento, que não sendo seguidas comprometem a vida do compressor aumentando muito as chances de uma falha a curto prazo. Portanto, é interessante que o equipamento trabalhe com níveis de Super Aquecimento equivalentes ao assumido pela região anelar anteriormente citada.

FIGURA 42 – Distribuição do resíduo obtido pelo ajuste feito para o Super Aquecimento em função do seu valor estimado.

FIGURA 43 - Distribuição de frequências do resíduo do modelo ajustado para o Super Aquecimento.

FIGURA 44 – Valores normalizados do resíduo obtido pelo polinômio ajustado para o Super Aquecimento.

FIGURA 45 – Superfície de Resposta levantada para o Super Aquecimento considerando o Comprimento do Capilar em seu nível intermediário.

FIGURA 46 – Curva de Nível levantada para o Super Aquecimento considerando o Comprimento do Capilar em seu nível intermediário.

6.3.4 - Análise da Temperatura de Descarga

A TABELA 26 apresenta a Análise de Variância feita para os dados levantados na TABELA 13 relativos à Temperatura de Descarga.

TABELA 26 - Análise de Variância feita com o os dados obtidos para a Temperatura de Descarga.

Fontes de Variabilidade	S.Q.	G.L.	Q.M.	F	P		Efeitos
Interseção		1					96,34
x_1 (Linear)	486,1	1	486,1	40,4	7,1E-06	✓	-8,44
x_1 (Quadrático)	81,2	1	81,2	6,7	0,019	✓	-4,19
x_2 (Linear)	35,1	1	35,1	2,9	0,11	✓	2,27
x_2 (Quadrático)	25,7	1	25,7	2,1	0,16	✓	2,35
x_3 (Linear)	50,4	1	50,4	4,2	0,056	✓	-2,72
x_3 (Quadrático)	10,7	1	10,7	0,9	0,36		-1,52
$x_1.x_2$	25,8	1	25,8	2,1	0,16	✓	2,54
$x_1.x_3$	950,2	1	950,2	79,0	8,4E-08	✓	-15,41
$x_2.x_3$	2,5	1	2,5	0,2	0,66		0,79
Falta de Ajuste	203,1	5	40,6	3,4	0,027		
Erro Puro	204,4	17	12,0				
Total	2139,9	32					

Ressaltando os termos mais significativos indicados na TABELA 26, através da FIGURA 47, constatamos que os quatro mais intensos são vinculados a x_1 e x_3 , que responsabilizam-se por 73% da variabilidade total relativa à Temperatura de Descarga. A maior influência é proveniente da interação $x_1.x_3$ seguida pelos termos linear e quadrático de x_1 e o linear de x_3 . Os sinais dos efeitos dos termos quadráticos são invertidos indicando que a relação entre estas duas variáveis gera um ponto de sela, conforme FIGURA 51 e FIGURA 52.

FIGURA 47 - Valor das variâncias em função das respectivas fontes de variabilidade com relação à Temperatura de Descarga.

Efetuada o ajuste dos dados a partir do modelo da EQUAÇÃO 26, substituindo as variáveis independentes pelas EQUAÇÕES 23, 24 e 25 e desprezando os termos não significativos obtivemos a EQUAÇÃO 35.

$$\begin{aligned}
 \hat{y} = & 95,15 - 4,22 \cdot \left(\frac{D - 1,35}{0,279} \right) + 1,13 \cdot \left(\frac{C - 2,50}{0,5} \right) - 1,36 \cdot \left(\frac{G - 262,5}{50} \right) + \\
 & + 1,27 \cdot \left(\frac{D - 1,35}{0,279} \right) \cdot \left(\frac{C - 2,5}{0,5} \right) - 7,70 \cdot \left(\frac{D - 1,35}{0,279} \right) \cdot \left(\frac{G - 262,5}{50} \right) + \\
 & - 1,77 \cdot \left(\frac{D - 1,35}{0,279} \right)^2 + 1,50 \cdot \left(\frac{G - 2,5}{0,5} \right)^2
 \end{aligned} \quad (35)$$

O comportamento da distribuição do resíduo, gerado pelo ajuste, em função do valor estimado pode ser visto na FIGURA 48. A distribuição mostra-se razoável apesar de uma certa concentração dos pontos do lado direito. Na FIGURA 49 onde verificamos a frequência do resíduo constatamos uma leve discrepância dos dados comparativamente à normal esperada. A FIGURA 50 que apresenta os valores normalizados do resíduo mostra-se razoável. O teste de normalidade Kolmogorov –

Smirnov afirma a normalidade da distribuição com uma significância de 12%, considerada aceitável.

Depois de verificado o resíduo partimos para a avaliação do ajuste executando uma análise de variância apresentada na TABELA 27. O modelo alcança um bom índice de explicação dos dados, justificando 80,3% da variabilidade total, mas, que no entanto, assume um alto desvio padrão de 4,2°C.

TABELA 27 – Análise de Variância do modelo ajustado para a Temperatura de Descarga.

Fontes de Variabilidade	S.Q.	G.L.	Q.M.	F	P
Modelo	1719,3	8	214,9	18,1	6,7E-07
Falta de Ajuste	219,3	7	31,3	2,6	0,048
Erro Puro	201,4	17	11,8		
Total	2139,9	32			

$R^2 = 0,803$
 $R = 0,896$
 Desvio Padrão do Erro Total = 4,2 °C

Construindo a Superfície de Resposta através do modelo ajustado, obtivemos a FIGURA 51 e também a FIGURA 52, na forma de Curvas de Nível. A variável resposta aqui em questão tem grande importância no que se refere à vida útil de um equipamento frigorífico. Diversos aspectos colaboram para a ocorrência de problemas na medida em que trabalhamos com uma Temperatura de Descarga muito elevada em sistemas frigoríficos. Tais aspectos não são o âmago deste trabalho, o que queremos aqui é saber quais as combinações de valores para o Diâmetro Interno e Comprimento do Capilar e para a Carga de Refrigerante que podemos utilizar a fim de manter esta temperatura dentro da níveis adequados. Segundo STOECKER (1988) os fabricantes de compressores recomendam que a Temperatura de Descarga não ultrapasse 135°C. Observando a FIGURA 52 constatamos que não temos temperaturas atingindo este valor, entretanto, como o desvio padrão é de 4,2°C torna-se interessante levar em conta este fato no controle da temperatura. Definindo um intervalo de confiança de 95% teremos uma faixa correspondente a $\pm 8,4^\circ\text{C}$. Considerando a região em cor laranja claro ou então as regiões em amarelo temos uma faixa de temperaturas entre 95 a 104°C. Atribuindo o intervalo de confiança a estes valores obteremos, no máximo, valores na ordem de 112,4°C, que se encontram a mais de 20°C abaixo do limite recomendado.

FIGURA 48 - Distribuição do resíduo obtido pelo modelo ajustado para a Temperatura de Descarga em função do seu valor estimado.

FIGURA 49 - Distribuição de frequências do resíduo do modelo ajustado para a Temperatura de Descarga.

FIGURA 50 – Valores normalizados do resíduo obtido pelo polinômio ajustado para a Temperatura de Descarga.

FIGURA 51 – Superfície de Resposta levantada para a Temperatura de Descarga considerando o Comprimento do Capilar em seu nível intermediário.

FIGURA 52 – Curva de Nível levantada para a Temperatura de Descarga considerando o Comprimento do Capilar em seu nível intermediário.

6.3.5 - Análise do Sub Resfriamento

A TABELA 28 traz os resultados da Análise de Variância feita para os dados obtidos na TABELA 13, relativos ao Sub Resfriamento. Foram identificados os termos mais significativos e constatamos que as variáveis x_1 e x_3 controlam o Sub Resfriamento através dos termos linear de x_3 interação $x_1.x_3$ e linear de x_1 , responsáveis por 84% da variabilidade total. A FIGURA 53 revela graficamente as variabilidades para cada um dos termos significativos.

TABELA 28 - Análise de Variância feita com o os dados obtidos para o Sub Resfriamento.

Fontes de Variabilidade	S.Q	G.L.	Q.M.	F	P	Efeitos
Interseção		1				16,29
x_1 (Linear)	63,9	1	63,9	91,7	2,9E-08	✓ -3,06
x_1 (Quadrático)	0,8	1	0,8	1,2	0,30	0,42
x_2 (Linear)	1,8	1	1,8	2,6	0,12	0,52
x_2 (Quadrático)	3,2	1	3,2	4,5	0,048	✓ 0,83
x_3 (Linear)	186,5	1	186,5	267,6	7,8E-12	✓ 5,23
x_3 (Quadrático)	1,2	1	1,2	1,7	0,21	-0,50
$x_1.x_2$	1,4	1	1,4	2,1	0,17	-0,60
$x_1.x_3$	122,1	1	122,1	175,2	2,2E-10	✓ -5,53
$x_2.x_3$	1,1	1	1,1	1,6	0,23	0,53
Falta de Ajuste	48,0	5	9,6	13,8	1,8E-05	
Erro Puro	11,9	17	0,7			
Total	444,6	32				

Fazendo o ajuste com base no modelo quadrático, descrito pela EQUAÇÃO 26, tivemos como resultado a EQUAÇÃO 36 que considera apenas os termos significativos. A distribuição do resíduo gerado pelo ajuste foi analisada pela observação da FIGURA 54, que revelou uma clara tendência dos pontos, indicando que o modelo está inadequado. A FIGURA 56 também mostrou uma discrepância quanto ao comportamento dos pontos em relação à linha normal. Entretanto, apesar destas irregularidades a distribuição de frequência do resíduo, revelada pela FIGURA 55, mostrou-se aceitável, e pelo teste de normalidade Kolmogorov – Smirnov a distribuição é afirmada normal com uma significância de 9%.

FIGURA 53 - Valor das variâncias em função das respectivas fontes de variabilidade com relação ao Sub Resfriamento.

A controvérsia entre os resultados demonstra que a análise do resíduo deve ser feita por diversas formas, sendo que quando não houver uma unanimidade torna-se interessante um estudo mais acurado do modelo.

$$\begin{aligned} \hat{y} = & 16,25 - 1,53 \cdot \left(\frac{D - 1,35}{0,279} \right) + 0,42 \cdot \left(\frac{C - 2,50}{0,5} \right)^2 + 2,61 \cdot \left(\frac{G - 262,5}{50} \right) + \\ & - 2,76 \cdot \left(\frac{D - 1,35}{0,279} \right) \cdot \left(\frac{G - 262,5}{50} \right) \end{aligned} \quad (36)$$

Constatando o resíduo inadequado decidimos lançar mão de um modelo cúbico cuja forma geral é descrita pela EQUAÇÃO 37. Fazendo o ajuste pelo método dos mínimos quadrados, selecionando os termos mais significativos e substituindo x_1 , x_2 e x_3 pelas EQUAÇÕES 23, 24 E 25, obtivemos a EQUAÇÃO 38. O resíduo resultante foi colocado no gráfico da FIGURA 57 em função dos valores estimados, onde verificamos que a distribuição sofreu uma efetiva melhora com a eliminação da tendência formada pelo modelo anterior. A frequência do resíduo se mostrou um pouco discrepante, conforme FIGURA 58, especialmente se comparada

com a obtida pelo modelo anterior. Por fim a FIGURA 59 mostrou uma considerável concordância dos pontos com a normal esperada. Em relação ao teste de normalidade Kolmogorov – Smirnov o resíduo pode ser considerado normal com uma significância de 8,9%. Apesar de algumas imperfeições na distribuição da frequência, consideramos aceitável o resíduo obtido com base no modelo cúbico.

$$\begin{aligned}\hat{y} = & \beta_0 + \beta_1 \cdot x_1 + \beta_2 \cdot x_2 + \beta_3 \cdot x_3 + \beta_{12} \cdot x_1 \cdot x_2 + \beta_{13} \cdot x_1 \cdot x_3 + \beta_{23} \cdot x_2 \cdot x_3 + \\ & + \beta_{112} \cdot x_1^2 \cdot x_2 + \beta_{113} \cdot x_1^2 \cdot x_3 + \beta_{221} \cdot x_2^2 \cdot x_1 + \beta_{223} \cdot x_2^2 \cdot x_3 + \beta_{331} \cdot x_3^2 \cdot x_1 + \beta_{332} \cdot x_3^2 \cdot x_2 + \\ & + \beta_{111} \cdot x_1^3 + \beta_{222} \cdot x_2^3 + \beta_{333} \cdot x_3^3 + \beta_{123} \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3\end{aligned}\quad (37)$$

$$\begin{aligned}\hat{y} = & 16,61 - 0,76 \cdot \left(\frac{D - 1,35}{0,279} \right) + 0,85 \cdot \left(\frac{G - 262,5}{50} \right) - 2,76 \cdot \left(\frac{D - 1,35}{0,279} \right) \cdot \left(\frac{G - 262,5}{50} \right) + \\ & + 1,21 \cdot \left(\frac{D - 1,35}{0,279} \right)^2 \cdot \left(\frac{G - 262,5}{50} \right) + 1,21 \cdot \left(\frac{C - 2,5}{0,5} \right)^2 \cdot \left(\frac{G - 262,5}{50} \right) + \\ & - 1,32 \cdot \left(\frac{D - 1,35}{0,279} \right) \cdot \left(\frac{G - 262,5}{50} \right)^2 + 0,20 \cdot \left(\frac{G - 262,5}{50} \right)^3 + \\ & - 0,26 \cdot \left(\frac{D - 1,35}{0,279} \right) \cdot \left(\frac{C - 2,5}{0,5} \right) \cdot \left(\frac{G - 262,5}{50} \right)\end{aligned}\quad (38)$$

O modelo ajustado explica 92,9% da variabilidade e o erro assumiu um desvio padrão bem reduzido igual a 1,2°C, conforme podemos verificar pela Análise de Variância apresentada na TABELA 29.

TABELA 29 - Análise de Variância do modelo cúbico ajustado para o Sub Resfriamento.

Fontes de Variabilidade	S.Q.	G.L.	Q.M.	F	P
Modelo	413,0	9	45,9	65,9	1,9E-11
Falta de Ajuste	19,8	6	3,3	4,7	0,0052
Erro Puro	11,8	17	0,7		
Total	444,6	32			

$R^2 = 0,929$
 $R = 0,964$
 Desvio Padrão do Erro Total = 1,2 °C

A Superfície de Resposta obtida com base no modelo gerado revelou-se muito interessante. Constatamos que as superfícies geradas assumiram

algumas diferenças em função do nível de x_2 , e em função deste fato levantamos as Superfícies de Resposta e Curvas de Nível para três níveis desta variável. A FIGURA 60 e a FIGURA 61, levantadas para o nível $x_2 = -1$, revelam uma região central onde a variável resposta mantém-se razoavelmente constante. Verificamos uma redução da resposta em três dos quatro cantos do gráfico, sendo que em um deles constatamos um aumento. Conforme reduzimos o Diâmetro Interno do Capilar e aumentamos a Carga de Refrigerante verifica-se um aumento no Sub Resfriamento. Passando para o nível $x_2 = 0$ verificamos que a FIGURA 62 e a FIGURA 63 sofrem pequenas modificações como um pequeno aumento do nível (aproximadamente 1°C) na região central. A tendência se manteve ao passarmos para $x_2 = +1$, conforme constatamos na FIGURA 64 e FIGURA 65, verifica-se novamente um pequeno aumento do nível (aproximadamente 1°C) na região central. No canto superior esquerdo onde verificamos os maiores valores alcançados observa-se uma certa independência entre os valores atingidos e o nível de x_2 . Ou seja, apesar das mudanças observadas nas figuras, os máximos valores atingidos não se modificaram significativamente.

FIGURA 54 - Distribuição do resíduo obtido pelo modelo quadrático ajustado para o Sub Resfriamento em função do seu valor estimado.

FIGURA 55 - Distribuição de frequências do resíduo do modelo quadrático ajustado para o Sub Resfriamento.

FIGURA 56 - Valores normalizados do resíduo obtido pelo modelo quadrático ajustado para o Sub Resfriamento.

FIGURA 57 - Distribuição do resíduo obtido pelo modelo cúbico ajustado para o Sub Resfriamento em função do seu valor estimado.

FIGURA 58 - Distribuição de frequências do resíduo do modelo cúbico ajustado para o Sub Resfriamento.

FIGURA 59 - Valores normalizados do resíduo obtido pelo modelo cúbico ajustado para o Sub Resfriamento.

FIGURA 60 – Superfície de Resposta levantada para o Sub Resfriamento considerando o nível $x_2 = -1$ equivalente ao Comprimento do Capilar igual a $2,0m$.

FIGURA 61 – Superfície de Resposta levantada para o Sub Resfriamento considerando o nível $x_2 = -1$ equivalente ao Comprimento do Capilar igual a $2,0m$.

FIGURA 62 – Superfície de Resposta levantada para o Sub Resfriamento considerando o nível $x_2 = 0$ equivalente ao Comprimento do Capilar igual a 2,5m.

FIGURA 63 – Superfície de Resposta levantada para o Sub Resfriamento considerando o nível $x_2 = 0$ equivalente ao Comprimento do Capilar igual a 2,5m.

FIGURA 64 – Superfície de Resposta levantada para o Sub Resfriamento considerando o nível $x_2 = +1$ equivalente ao Comprimento do Capilar igual a 3,0m.

FIGURA 65 – Superfície de Resposta levantada para o Sub Resfriamento considerando o nível $x_2 = +1$ equivalente ao Comprimento do Capilar igual a 3,0m.

6.3.6 - Análise da Vazão de Refrigerante

A TABELA 30 apresenta os resultados da análise de variância feita para os dados obtidos na TABELA 13 relativos à Vazão de Refrigerante.

TABELA 30 – Análise de Variância dos resultados obtidos para Capacidade Frigorífica na Fase 3.

Fontes de Variabilidade	S.Q.	G.L.	Q.M.	F	P	Efeitos
Interseção		1				7,72
x_1 (Linear)	5,0	1	5,0	41,5	6,1E-06	✓ 0,86
x_1 (Quadrático)	29,1	1	29,1	239,7	1,9E-11	✓ -2,51
x_2 (Linear)	0,013	1	0,013	0,1	0,75	0,043
x_2 (Quadrático)	0,036	1	0,036	0,3	0,59	-0,089
x_3 (Linear)	2,7	1	2,7	22,2	2,0E-04	✓ 0,63
x_3 (Quadrático)	9,2	1	9,2	76,0	1,1E-07	✓ -1,41
$x_1.x_2$	1,9	1	1,9	16,0	9,2E-04	✓ 0,70
$x_1.x_3$	10,6	1	10,6	87,4	4,1E-08	✓ -1,63
$x_2.x_3$	0,0072	1	0,0072	0,1	0,81	-0,042
Falta de Ajuste	3,1	5	0,61	5,1	0,0051	
Erro Puro	2,1	17	0,12			
Total	62,3	32				

Identificando os termos significativos e apresentando suas variabilidades graficamente através da FIGURA 66, pudemos avaliar as influencias sobre a variável resposta. Os cinco termos mais influentes são todos oriundos das variáveis x_1 e x_3 , e responsabilizam-se por 89% da variabilidade total sendo que o termo mais influente é o quadrático de x_1 e o menos a interação $x_1.x_2$. Podemos dizer que as variáveis x_1 e x_3 governam o comportamento da Vazão de Refrigerante.

Baseado nos termos mais significativos determinamos o modelo ajustado para esta variável resposta, representado pela EQUAÇÃO 39.

FIGURA 66 – Valor de variâncias em função das respectivas fontes de variabilidade com relação à Vazão de Refrigerante.

Observando os gráficos levantados para o resíduo obtido pelo ajuste constatamos resultados razoáveis para a distribuição dos pontos em função dos valores estimados através da FIGURA 67, e para a forma normalizada através da FIGURA 69. A distribuição de frequência do resíduo revelou uma certa discordância quanto à normalidade, conforme a FIGURA 68. Podemos substantiar a análise pelo teste de normalidade de Kolmogorov – Smirnov, afirmando que o resíduo assume uma distribuição normal com significância de 11%. Com base nestes resultados consideramos o resíduo razoavelmente satisfatório.

$$\begin{aligned}
 \hat{y} = & 7,649 + 0,429 \left(\frac{D - 1,35}{0,279} \right) + 0,314 \left(\frac{G - 262,5}{50} \right) + \\
 & + 0,349 \left(\frac{D - 1,35}{0,279} \right) \left(\frac{C - 2,5}{0,5} \right) - 0,814 \left(\frac{D - 1,35}{0,279} \right) \left(\frac{G - 262,5}{50} \right) + \\
 & - 1,234 \left(\frac{D - 1,35}{0,279} \right)^2 - 0,687 \left(\frac{G - 262,5}{50} \right)^2
 \end{aligned} \tag{39}$$

Avaliando o ajuste verificamos pelo índice R^2 , que o modelo ajustado explica 91,7% da variabilidade dos dados, conforme pode ser verificado na TABELA 31, e o desvio padrão do erro total é igual a 0,46g/s.

TABELA 31 - Análise de Variância do modelo ajustado para a Vazão de Refrigerante.

Fontes de Variabilidade	S.Q.	G.L.	Q.M.	F	P
Modelo	57,1	8	7,14	59,8	6,2E-11
Falta de Ajuste	3,2	7	0,45	3,8	0,012
Erro Puro	2,0	17	0,12		
Total	62,3	32			

$R^2 = 0,917$
 $R = 0,957$
 Desvio Padrão do Erro Total = 0,46 g/s

Considerando o resíduo aceitável levantamos a Superfície de Resposta da Vazão de Refrigerante em função das variáveis independentes mais significativas, representada pela FIGURA 70. O aspecto mais interessante é a semelhança com a superfície obtida para a Capacidade Frigorífica (FIGURA 29). Isto ressalta a relação estreita entre estas duas variáveis que demonstraram um comportamento praticamente idêntico. Desta forma as análises são semelhantes para ambas as superfícies no que se refere à relação entre as variáveis independentes e suas repercussões na resposta.

FIGURA 67 - Distribuição do resíduo obtido para o modelo ajustado para a Vazão de Refrigerante em função do seu valor estimado.

FIGURA 68 – Distribuição de frequências do resíduo obtido para o modelo ajustado para a Vazão de Refrigerante.

FIGURA 69 – Valores normalizados do resíduo obtido pelo modelo ajustado para a Vazão de Refrigerante.

6.3.7 - Análise da Temperatura de Evaporação

A TABELA 32 traz os valores da Análise de Variância feita para os dados da TABELA 13 relativos à Temperatura de Evaporação.

TABELA 32 - Análise de Variância feita com o os dados obtidos para a Temperatura de Evaporação.

Fontes de Variabilidade	S.Q.	G.L.	Q.M.	F	P		Efeitos
Interseção		1					0,99
x_1 (Linear)	979,9	1	979,9	688,1	3,4E-15	✓	11,98
x_1 (Quadrático)	255,7	1	255,7	179,5	1,8E-10	✓	-7,43
x_2 (Linear)	40,4	1	40,4	28,4	5,6E-05	✓	-2,43
x_2 (Quadrático)	0,0	1	0,0	0,0	0,97		-0,02
x_3 (Linear)	388,2	1	388,2	272,6	6,7E-12	✓	7,54
x_3 (Quadrático)	39,5	1	39,5	27,8	6,3E-05	✓	-2,92
$x_1.x_2$	17,9	1	17,9	12,5	0,0025	✓	2,11
$x_1.x_3$	106,6	1	106,6	74,9	1,2E-07	✓	-5,16
$x_2.x_3$	0,1	1	0,1	0,1	0,79		0,16
Falta de Ajuste	50,2	5	10,0	7,1	0,0010		
Erro Puro	24,2	17	1,4				
Total	1920,6	32					

Os valores das variâncias mais significativas foram colocados no gráfico da FIGURA 72. Constata-se que as variáveis x_1 e x_3 dominam o comportamento da Temperatura de Evaporação através dos quatro termos responsáveis pelas maiores variabilidades. Estes quatro termos são responsáveis por aproximadamente 90% da variabilidade total, e portanto, exercem pleno comando sobre a variável resposta através do Diâmetro Interno do Capilar e da Carga de Refrigerante.

FIGURA 72 - Valor de variâncias em função das respectivas fontes de variabilidade com relação à Temperatura de Evaporação.

A EQUAÇÃO 21 foi obtida com base no modelo da EQUAÇÃO 26, a partir da qual consideramos os termos mais significativos e substituímos as variáveis independentes pelas EQUAÇÕES 23, 24 e 25.

$$\begin{aligned}
 \hat{y} = & 0,972 + 5,990 \left(\frac{D - 1,35}{0,279} \right) - 1,216 \left(\frac{C - 2,5}{0,5} \right) + 3,770 \left(\frac{G - 262,5}{50} \right) + \\
 & + 1,056 \left(\frac{D - 1,35}{0,279} \right) \left(\frac{C - 2,5}{0,5} \right) - 2,581 \left(\frac{D - 1,35}{0,279} \right) \left(\frac{G - 262,5}{50} \right) + \\
 & - 3,710 \left(\frac{D - 1,35}{0,279} \right)^2 - 1,456 \left(\frac{G - 262,5}{50} \right)^2
 \end{aligned} \quad (40)$$

Os gráficos (FIGURA 73, FIGURA 74 e FIGURA 75) levantados para avaliação do resíduo demonstraram um comportamento um pouco fora do esperado, sem entretanto, invalidar o modelo empregado. Segundo o teste de Kolmogorov – Smirnov, a distribuição do resíduo pode ser considerada normal com uma significância de 16,2%. Apesar deste índice ter sido o maior obtido, ainda assim consideramos o resíduo aceitável.

TABELA 33 – Análise de Variância do modelo ajustado para a Temperatura de Evaporação.

Fontes de Variabilidade	S.Q.	G.L.	Q.M.	F	P
Modelo	1846,1	8	230,8	162,0	1,7E-14
Falta de Ajuste	50,3	7	7,2	5,0	0,0030
Erro Puro	24,2	17	1,4		
Total	1920,6	32			

$R^2 = 0,961$
 $R = 0,980$
 Desvio Padrão do Erro Total = 1,8 °C

Observando os resultados da análise de variância (TABELA 33), feita para o ajuste, constatamos que 96,1% da variabilidade é explicada pelo modelo. Um índice considerado bastante interessante, especialmente quando associado ao desvio padrão de 1,8°C para o erro.

A Superfície de Resposta obtida a partir do modelo elaborado pode ser vista na FIGURA 76, e as respectivas Curvas de Nível na FIGURA 77. Verificamos que variações de forma direta entre o Diâmetro Interno do Capilar e a Carga de Refrigerante promovem variações mais intensas na Temperatura de Evaporação do que variações de forma inversa.

FIGURA 73 - Distribuição do resíduo obtido pelo modelo ajustado para a Temperatura de Evaporação em função do seu valor estimado.

FIGURA 74 - Distribuição de frequências do resíduo do modelo ajustado para a Temperatura de Evaporação.

FIGURA 75 – Valores normalizados do resíduo obtido pelo polinômio ajustado para a Temperatura de Evaporação.

FIGURA 76 – Superfície de Resposta levantada para a Temperatura de Evaporação para o Comprimento do Capilar em seu nível intermediário.

FIGURA 77 – Curva de Nível levantada para a Temperatura de Evaporação considerando o comprimento do capilar em seu nível intermediário.

6.3.8 - Análise da Temperatura de Condensação

A Análise de Variância feita para a Temperatura de Condensação com base nos dados da TABELA 13 pode ser visto na TABELA 34.

TABELA 34 - Análise de Variância feita com o os dados obtidos para a Temperatura de Condensação.

Fontes de Variabilidade	S.Q.	G.L.	Q.M.	F	P	Efeitos
Interseção		1				67,43
x_1 (Linear)	265,9	1	265,9	72,4	1,6E-07	✓ 6,24
x_1 (Quadrático)	207,4	1	207,4	56,5	8,4E-07	✓ -6,69
x_2 (Linear)	15,3	1	15,3	4,2	0,057	-1,50
x_2 (Quadrático)	0,1	1	0,13	0,035	0,85	0,17
x_3 (Linear)	789,5	1	789,5	215,1	4,4E-11	✓ 10,75
x_3 (Quadrático)	23,5	1	23,5	6,4	0,021	✓ -2,25
$x_1.x_2$	26,0	1	26,0	7,1	0,016	✓ 2,55
$x_1.x_3$	171,6	1	171,6	46,8	2,9E-06	✓ -6,55
$x_2.x_3$	0,7	1	0,7	0,20	0,66	0,42
Falta de Ajuste	63,2	5	12,6	3,4	0,025	
Erro Puro	62,4	17	3,7			
Total	1652,8	32				

As variabilidades dos termos significativos foram colocadas no gráfico apresentado na FIGURA 78. Mais uma vez as variáveis x_1 e x_3 exercem um completo domínio sobre a variável resposta através dos quatro termos mais influentes, responsáveis por 88% da variabilidade total e liderado pelo termo linear de x_3 .

Considerando os termos selecionados dentro de uma significância de 5%, fizemos o ajuste dos dados com base no modelo quadrático descrito na EQUAÇÃO 26. Substituindo as variáveis independentes pelas EQUAÇÕES 23, 24 e 25 obtivemos, então, a EQUAÇÃO 41.

FIGURA 78 - Valor de variâncias em função das respectivas fontes de variabilidade com relação à Temperatura de Condensação.

A distribuição do resíduo em função dos valores estimados para a variável resposta estão apresentados na FIGURA 79. Apesar de uma leve concentração dos pontos do lado direito, a distribuição mostra-se razoavelmente aleatória e centrada no zero. A frequência do resíduo, apresentada na FIGURA 80, revela alguma discordância, mas ainda dentro do aceitável. O teste de normalidade de Kolmogorov – Smirnov afirma que a distribuição é normal com uma significância de 11,8% que consideramos razoável. Finalmente, a FIGURA 81 mostra a forma normalizada do resíduo em contraste com a linha normal esperada, revelando-se também razoável.

$$\begin{aligned}
 \hat{Y} = & 67,56 + 3,12 \left(\frac{D - 1,35}{0,279} \right) + 5,38 \left(\frac{G - 262,5}{50} \right) + \\
 & + 1,28 \left(\frac{D - 1,35}{0,279} \right) \left(\frac{C - 2,5}{0,5} \right) - 3,28 \left(\frac{D - 1,35}{0,279} \right) \left(\frac{G - 262,5}{50} \right) + \\
 & - 3,38 \left(\frac{D - 1,35}{0,279} \right)^2 - 1,16 \left(\frac{G - 262,5}{50} \right)^2
 \end{aligned} \quad (41)$$

Uma vez aporvado o resíduo elaboramos a Análise de Variância para o ajuste, apresentada na TABELA 35. O ajuste explica 91,4% dos dados e o erro assumiu um desvio padrão igual a 2,4°C. Tais resultados foram considerados em níveis aceitáveis.

TABELA 35 - Análise de Variância do modelo ajustado para a Temperatura de Condensação.

Fontes de Variabilidade	S.Q.	G.L.	Q.M.	F	P
Modelo	1511,1	7	215,9	59,6	1,0E-10
Falta de Ajuste	80,1	8	10,0	2,8	0,04
Erro Puro	61,6	17	3,6		
Total	1652,8	32			

$$R^2 = 0,914$$

$$R = 0,956$$

$$\text{Desvio Padrão do Erro Total} = 2,4 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Com base no modelo elaborado levantamos a Superfície de Resposta, vista na FIGURA 82, acompanhada pelas Curvas de Nível, apresentada na FIGURA 83. Verificamos que valores intermediários do Diâmetro Interno do Capilar associados a altas Cargas de Refrigerante promovem o aumento da Temperatura de Condensação, e por outro lado, uma redução quando caminhamos para parte esquerda inferior.

FIGURA 79 - Distribuição do resíduo obtido pelo modelo ajustado para a Temperatura de Condensação em função do seu valor estimado.

FIGURA 80 - Distribuição de frequências do resíduo do modelo ajustado para a Temperatura de Condensação.

FIGURA 81 - Valores normalizados do resíduo obtido pelo polinômio ajustado para a Temperatura de Condensação.

FIGURA 82 – Superfície de Resposta levantada para a Temperatura de Condensação considerando o Comprimento do Capilar em seu nível intermediário.

FIGURA 83 - Curva de Nível levantada para a Temperatura de Condensação considerando o Comprimento do Capilar em seu nível intermediário.

6.3.9 - Resumo dos Resultados

Os resultados obtidos nas análises feitas nas seções anteriores estão reunidos na TABELA 36. Os termos mais significativos obtidos face a variabilidade, com base num nível de significância de 5%, para cada uma das variáveis resposta estão relacionados. As variáveis independentes na forma codificada compõem cada um dos termos, que podem ser de interação ou principais. Neste último caso temos termos lineares ou quadráticos indicados pela letra "L" ou "Q", entre parênteses, localizada a sua direita.

TABELA 36 – Termos mais significativos para a variabilidade de cada variável resposta.

VARIÁVEL RESPOSTA	TERMOS MAIS SIGNIFICATIVOS (Significância < 5%)						
Capacidade Frigorífica	x_1 (Q) (43,8)	$x_1 \cdot x_3$ (25,4)	x_3 (Q) (12,8)	$x_1 \cdot x_2$ (2,7)	x_1 (L) (1,7)	-	-
Coeficiente de Eficácia	x_1 (L) (25,6)	x_3 (L) (21,6)	x_1 (Q) (17,3)	$x_1 \cdot x_3$ (10,7)	x_2 (L) (5,9)	x_3 (Q) (4,6)	-
Super Aquecimento	x_1 (L) (46,1)	x_3 (L) (24,4)	x_1 (Q) (16)	x_3 (Q) (5,4)	x_2 (L) (2,3)	$x_1 \cdot x_3$ (1,8)	$x_1 \cdot x_2$ (0,5)
Temperatura de Descarga	$x_1 \cdot x_3$ (44,4)	x_1 (L) (22,7)	x_1 (Q) (3,8)	x_3 (L) (2,4)	x_2 (L) (1,6)	$x_1 \cdot x_2$ (1,2)	x_2 (Q) (1,2)
Sub Resfriamento	x_3 (L) (42)	$x_1 \cdot x_3$ (27,5)	x_1 (L) (14,4)	x_1 (Q) (7)	-	-	-
Vazão de Refrigerante	x_1 (Q) (46,7)	$x_1 \cdot x_3$ (17)	x_3 (Q) (14,8)	x_1 (L) (8,1)	x_3 (L) (4,3)	$x_1 \cdot x_2$ (3,1)	-
Temperatura de Evaporação	x_1 (L) (51)	x_3 (L) (20,2)	x_1 (Q) (13,3)	$x_1 \cdot x_3$ (5,6)	x_2 (L) (2,1)	x_3 (Q) (2,1)	$x_1 \cdot x_2$ (0,9)
Temperatura de Condensação	x_3 (L) (48,6)	x_1 (L) (16,4)	x_1 (Q) (12,8)	$x_1 \cdot x_3$ (10,6)	$x_1 \cdot x_2$ (1,6)	x_3 (Q) (1,4)	-

O número colocado, entre parênteses, abaixo de cada termo revela a sua contribuição percentual na variabilidade total da variável resposta. Com base neste valor foi estabelecida a ordem, decrescente da esquerda para a direita, com que os termos foram posicionados. Observando a tabela constatamos que se

relacionarmos os quatro termos mais influentes, todos eles serão oriundos das variáveis independentes x_1 e x_3 , ou seja, Diâmetro Interno do Capilar e Carga de Refrigerante. Somando o percentual que estes quatro termos contribuem para a variabilidade veremos que esta soma é sempre superior a 70% para todas as respostas, chegando a 91,9%. A Capacidade Frigorífica não se enquadra exatamente na afirmação acima, mas não foge à tendência. No caso dela apenas os três termos mais influentes dependem de x_1 e x_3 , pois o quarto é $x_1.x_2$. Entretanto, se somarmos o percentual destes três primeiros termos veremos que eles totalizam 82%. Portanto, verificamos que o Diâmetro Interno do Tubo Capilar e a Carga de Refrigerante são as variáveis mais importantes para as oito variáveis resposta analisadas. Analisando separadamente cada uma delas, verificamos que não há uma unanimidade com relação a qual das duas variáveis independentes, x_1 ou x_3 , é isoladamente a mais importante, sendo o mesmo para os termos quadráticos ou lineares. O que constatamos é que, hora uma, hora outra, exerce o comando, e no caso particular da Temperatura de Descarga o termo de interação entre as duas é que faz este papel. O Comprimento do Capilar (x_2) exerce em todos os casos um papel pouco significativo influenciando muito pouco nas variáveis estudadas. Sua atuação mais incisiva ocorre em relação ao Coeficiente de Eficácia, onde seu termo linear colabora com 5,9% da variabilidade.

Relacionando também, os resultados obtidos para os ajustes feitos a partir dos modelos propostos, construímos a TABELA 37. Nela temos os percentuais das variabilidades explicadas pelos respectivos modelos e resíduos. O erro total é subdividido em erro por falta de ajuste e erro puro. O desvio padrão do erro também foi relacionado. Na última coluna da direita temos os valores da significância obtida pelo teste de Kolmogorov - Smirnov (K-S) para a normalidade das distribuições dos resíduos. O modelo proposto para a Temperatura de Descarga foi o que obteve menor percentual de explicação da variabilidade (80,3%) juntamente com um alto desvio padrão (4,2°C) e um alto nível de significância (12%) para o teste de normalidade da distribuição do resíduo. Já com relação ao modelo adotado para a Temperatura de Evaporação, verificamos o maior percentual (96,1%) de explicação da variabilidade com um estreito desvio padrão (1,8°C), entretanto, seu resíduo obteve o pior nível de significância (16,2°C) quanto ao teste de normalidade. Os

demais ajustes mantiveram-se entre estes dois extremos, ressaltando uma especial atenção para o modelo ajustado para o Sub Resfriamento que obteve um desvio padrão pequeno de 1,2°C associado a um percentual de explicação de 92,9% da variabilidade com uma significância de 9% para a normalidade do seu resíduo.

TABELA 37 – Resumo dos resultados obtidos para os ajustes feitos para cada variável resposta.

VARIÁVEL RESPOSTA	[%] MODELO	ERRO				[%] Teste K-S
		[%] Total	[%] Falta de Ajuste	[%] Puro	Desvio Padrão	
Capacidade Frigorífica	86,8	13,2	8,5	4,7	72,5W	7,4
Coeficiente de Eficácia	87,3	12,7	5,9	6,8	0,073	12,4
Super Aquecimento	95,0	5,0	3,4	1,6	3,1°C	9
Temperatura de Descarga	80,3	19,7	10,3	9,4	4,2°C	12
Sub Resfriamento	92,9	7,1	4,4	2,7	1,2°C	9
Vazão de Refrigerante	91,7	8,3	5,1	3,2	0,46g/s	11
Temperatura de Evaporação	96,1	3,9	2,6	1,3	1,8°C	16,2
Temperatura de Condensação	91,4	8,6	4,8	3,8	2,4°C	11,8

6.3.10 - Análise de Robustez

A dispersão dos valores de uma variável resposta pode estar vinculada ao nível das variáveis independentes das quais ela depende. As variáveis independentes e suas interações podem não proporcionar uma influência significativa no valor médio de uma variável resposta, mas podem influenciar sua variabilidade. Existem casos em que obter-se uma resposta com um mínimo de variabilidade pode ser de grande importância, e isto pode ser conseguido analisando sua dispersão em função dos níveis dos termos independentes. Procurando fazer esta avaliação elaboramos a TABELA 38, que relaciona o resíduo obtido para as oito variáveis resposta a partir dos níveis dos termos independentes. A idéia foi levantar a variabilidade dos resíduos para os níveis superior e inferior de cada um dos termos. A estatística “F” foi utilizada para estabelecer se há uma efetiva diferença entre as variabilidades obtidas em cada nível, constatada pelo levantamento da sua respectiva significância.

Na TABELA 39 temos na linha superior, a partir da direita, os termos independentes, na coluna da esquerda estão relacionadas as variáveis resposta. Para cada uma delas foram determinados os desvios padrão do seu resíduo nos níveis superior e inferior dos termos independentes, designados por S(+) e S(-) respectivamente. A estatística “F”, determinada pela relação da maior pela menor variabilidade do resíduo entre os dois níveis, está colocada na linha abaixo, e abaixo desta a significância “P” correspondente. Para um nível de significância de 5% pudemos ressaltar quatro casos onde as variabilidades mostram-se significativamente distintas em função do nível do termo independente. Estes casos estão marcados de forma sombreada na TABELA 39. A Capacidade Frigorífica obteve um resíduo cuja variabilidade é 3,9 vezes maior para o nível inferior de $x_1.x_3$ do que para o superior, com uma significância de 4,7%. Esta disparidade na dispersão do resíduo pode ser verificada graficamente através da FIGURA 84. O Coeficiente de Eficácia obteve uma variabilidade para o resíduo 7,8 vezes maior no nível inferior de x_1 do que no superior, com uma significância de 0,72%, o que podemos constatar na FIGURA 85. A FIGURA 86 apresenta este mesmo aspecto só que com relação à variabilidade do resíduo obtido para o Super Aquecimento, o qual se mostra 4,5 vezes maior no nível inferior de $x_1.x_3$ do que no superior, com uma significância de 3,3%. E finalmente,

verificamos que a variabilidade do resíduo relativo à Temperatura de Descarga é 5,3 vezes maior no nível inferior de $x_2.x_3$ do que no superior, com uma significância de 2,2%. Podemos conferir as dispersões na FIGURA 87.

Estes resultados podem ser apropriadamente utilizados levando em conta o conceito de robustez do sistema. Algumas combinações dos níveis das variáveis independentes permitem que variações nas respostas sejam reduzidas, tornando-se mais estáveis. Podemos dizer que as respostas são menos sensíveis, ou então adquirem um caráter robusto. Ilustrando, temos que nos casos em que $x_1.x_3$ está em seu nível superior a variabilidade do Super Aquecimento assume menores valores. Ou seja, quando o Diâmetro do Capilar e a Carga de Refrigerante estão simultaneamente em seus níveis superiores ou inferiores, o Super Aquecimento assume menores variações. Tal situação pode ser interessante quando se tem, por exemplo, um aparelho para dar carga de refrigerante que trabalhe com uma alta variabilidade. Esta alta dispersão na Carga de Refrigerante será menos perturbadora para o Super Aquecimento se estivermos na condição acima descrita.

TABELA 38 – Valores do residuo das Variáveis Resposta em função dos níveis de todos os termos das Variáveis Independentes.

Efeitos							Resíduo							
x_1	x_2	x_3	$x_1.x_2$	$x_1.x_3$	$x_2.x_3$	$x_1.x_2.x_3$	[W] Qe	CoEf	[°C] Saq	[°C] Tdesc	[°C] Sub	[g/s] Vaz	[°C] Tevap	[°C] Tcond
-1	-1	-1	1	1	1	-1	35	0,060	2,7	4,2	-0,3	-0,22	-0,7	0,4
1	-1	-1	-1	-1	1	1	85	-0,066	3,7	0,9	0,3	-0,49	-0,9	-1,7
-1	1	-1	-1	1	-1	1	61	-0,099	0,7	-4,4	0,1	-0,30	-1,0	-2,6
1	1	-1	1	-1	-1	-1	111	-0,008	6,5	-3,0	-0,6	-0,91	-3,6	-4,9
-1	-1	1	1	-1	-1	1	-44	0,007	-5,8	-1,6	0,4	0,31	2,8	2,9
1	-1	1	-1	1	-1	-1	-27	0,029	3,1	0,4	-0,2	-0,02	-0,7	-0,1
-1	1	1	-1	-1	1	-1	-140	0,113	1,4	3,1	2,5	0,41	1,5	1,7
1	1	1	1	1	1	1	-10	0,010	2,7	-2,0	0,0	-0,23	-0,6	-1,9
-1	-1	-1	1	1	1	-1	-59	0,107	-1,2	2,1	0,7	0,43	2,3	3,3
1	-1	-1	-1	-1	1	1	-4	-0,007	-4,0	0,4	1,2	0,36	0,8	0,7
-1	1	-1	-1	1	-1	1	-80	0,067	-2,3	3,1	1,5	0,57	1,9	1,3
1	1	-1	1	-1	-1	-1	27	0,000	2,9	-1,0	1,0	-0,18	-0,9	-1,0
-1	-1	1	1	-1	-1	1	-130	0,136	-0,8	8,7	-1,0	0,74	1,7	1,8
1	-1	1	-1	1	-1	-1	10	-0,022	1,2	4,0	0,7	-0,27	-0,3	0,0
-1	1	1	-1	-1	1	-1	10	-0,016	3,0	1,9	0,1	-0,48	-1,0	-0,4
1	1	1	1	1	1	1	-15	0,005	-0,1	1,9	1,4	-0,18	-0,4	-1,3

TABELA 39 – Análise da Variância do Resíduo em função dos níveis dos termos independentes.

VARIÁVEIS RESPOSTA		x_1	x_2	x_3	$x_1.x_2$	$x_1.x_3$	$x_2.x_3$	$x_1.x_2.x_3$
Capacidade Frigorífica [W]	S(+)	50	78	59	72	46	66	70
	S(-)	74	65	67	73	91	78	74
	F	2,2	1,5	1,3	1,0	3,9	1,4	1,1
	P	0,16	0,31	0,38	0,48	0,047	0,35	0,44
Coeficiente De Eficácia	S(+)	0,028	0,062	0,059	0,055	0,063	0,062	0,073
	S(-)	0,079	0,067	0,069	0,069	0,068	0,068	0,055
	F	7,8	1,2	1,4	1,6	1,2	1,2	1,8
	P	0,0072	0,41	0,34	0,29	0,42	0,41	0,24
Super Aquecimento [°C]	S(+)	3,1	2,6	3,0	3,7	2,0	2,6	3,2
	S(-)	2,9	3,5	3,5	2,7	4,2	3,8	2,2
	F	1,1	1,8	1,4	1,9	4,5	2,1	2,2
	P	0,44	0,23	0,34	0,21	0,033	0,18	0,16
Temperatura De Descarga [°C]	S(+)	2,2	2,9	3,4	3,9	3,0	1,9	4,0
	S(-)	3,9	3,2	3,0	2,6	3,6	4,3	2,5
	F	3,1	1,2	1,3	2,2	1,4	5,3	2,5
	P	0,081	0,41	0,36	0,16	0,32	0,022	0,13
Sub Resfriamento [°C]	S(+)	0,7	1,0	1,1	0,8	0,7	0,9	0,9
	S(-)	1,1	0,7	0,7	0,9	1,1	0,8	1,0
	F	2,4	2,1	2,1	1,2	2,5	1,2	1,3
	P	0,14	0,18	0,17	0,41	0,13	0,40	0,36
Vazão de Refrigerante [g/s]	S(+)	0,36	0,47	0,41	0,51	0,34	0,39	0,45
	S(-)	0,45	0,42	0,51	0,42	0,57	0,53	0,44
	F	1,5	1,2	1,5	1,5	2,8	1,9	1,1
	P	0,29	0,39	0,30	0,32	0,10	0,21	0,47
Temperatura de Evaporação [°C]	S(+)	1,3	1,7	1,4	2,1	1,3	1,2	1,5
	S(-)	1,6	1,5	1,9	1,2	2,0	2,1	1,8
	F	1,5	1,3	1,8	3,1	2,5	2,8	1,5
	P	0,29	0,35	0,22	0,080	0,12	0,10	0,30
Temperatura de Condensação [C]	S(+)	1,7	2,1	1,6	2,7	1,9	1,8	2,0
	S(-)	1,9	1,6	2,5	1,5	2,5	2,5	2,4
	F	1,2	1,7	2,4	3,6	1,7	2,0	1,4
	P	0,42	0,25	0,14	0,057	0,24	0,20	0,34

FIGURA 84 – Variabilidade do Resíduo obtido para a Capacidade Frigorífica em função do nível do termo $x_1.x_3$.

FIGURA 85 – Variabilidade do Resíduo obtido para o Coeficiente de Eficácia em função do nível do termo x_1 .

FIGURA 86 – Variabilidade do Resíduo obtido para o Super Aquecimento em função do nível do termo $x_1.x_3$.

FIGURA 87 – Variabilidade do Resíduo obtido para a Temperatura de Descarga em função do nível do termo $x_2.x_3$.

6.3.11 - Análise Conjunta dos Resultados

Nesta seção elaboramos uma análise considerando de forma conjunta as variáveis resposta envolvidas no desempenho do equipamento. A região onde foi determinado o ponto estacionário para a Capacidade Frigorífica é o palco das análises aqui desenvolvidas, conforme tem sido feito em diversas figuras anteriores. Como já constatado, o Comprimento do Capilar é uma variável de pouca influência, e por isso foi mantida constante em seu nível intermediário correspondente a 2,5m.

Lançando mão da FIGURA 30, selecionando apenas o setor elíptico central e atribuindo-lhe um contorno azul, construímos a FIGURA 90. Consideramos esta região como a de máxima Capacidade Frigorífica, e a preenchemos internamente em tom escuro para ressaltar a área de nosso interesse. Adicionando, à ela, outra região relativa aos melhores índices de Coeficiente de Eficácia obtida a partir da FIGURA 38, e atribuindo-lhe um contorno vermelho, obtivemos a FIGURA 91. A interseção entre os dois setores foi ressaltada por assumir as melhores condições para as duas respostas em questão, e portanto, de grande interesse. Seguindo o procedimento construímos a FIGURA 92 acrescentando uma região anelar em contorno verde (obtida na FIGURA 46), representando a faixa na qual é interessante que o sistema funcione, no que diz respeito ao Super Aquecimento. A interseção agora destacada estabelece o setor que contém as melhores condições de trabalho relativamente às três variáveis abordadas. Por fim acrescentamos mais uma região de interesse relativa à Temperatura de Descarga definida em tom laranja na FIGURA 52. Atribuindo-lhe um contorno preto e inserindo-a na FIGURA 92 obtivemos a FIGURA 93, onde a área em destaque determina onde desejamos que o equipamento atue obtendo um bom desempenho e preservando a vida útil do compressor. Chamaremos esta região de Região Alvo. É importante ressaltar que sobre o eixo das ordenadas, em que temos a Carga de Refrigerante, podemos caminhar livremente passando por valores distintos dos realizados nos ensaios. Entretanto, com relação ao eixo das abcissas, relativa ao Diâmetro Interno do Capilar, temos que nos ater aos valores disponíveis no mercado, os quais estabeleceram os valores que vemos nos gráficos. A Região Alvo envolve os

diâmetros 1,07mm; 1,35mm e 1,63mm, a partir dos quais podemos subir linhas verticais assumindo valores intermediários para a Carga de Refrigerante.

Considerando o Diâmetro de 1,07mm podemos assumir uma Carga de Refrigerante entre aproximadamente 270 a 310g para se manter dentro da Região Alvo, conforme gráfico da FIGURA 93. Trabalhando no limite superior estaremos delimitados pela Temperatura de Descarga, a qual aumentará se a Carga também o for (conforme FIGURA 52). Apesar das outras variáveis ainda permitirem um certo aumento neste sentido sem grandes prejuízos, estaríamos caminhando para um setor de elevadas Temperaturas de Descarga, que poderia comprometer a vida útil do compressor. O maior receio reside no alto desvio padrão ($4,2^{\circ}\text{C}$) do modelo ajustado para a Temperatura de Descarga nesta região, ou seja, o valor real pode estar muito distante do estimado podendo atingir níveis impróprios. Entretanto, verificamos na TABELA 39 que quando x_2, x_3 está no nível +1 a Temperatura de Descarga passa a ser determinada pelo modelo com um menor desvio padrão. Ou seja, quando a Carga de Refrigerante está em torno de 312,5g e o Comprimento do Capilar 3,0m, determinamos a Temperatura de Descarga a partir do modelo com um menor desvio padrão ($1,9^{\circ}\text{C}$). Fazendo os cálculos para um intervalo de confiança de 95% de certeza, a Temperatura de Descarga neste ponto seria igual a $105,3 \pm 3,8^{\circ}\text{C}$, ainda bem abaixo do limite máximo recomendado de 135°C . Reduzindo a Carga de Refrigerante caminhamos para o limite inferior e ficamos delimitados pelo Super Aquecimento, que neste sentido vai assumindo valores elevados. Ultrapassando o limite definido pela região alvo, o Super Aquecimento aumenta demasiadamente comprometendo a Capacidade Frigorífica caindo fora da sua região de máximo, cuja fronteira encontra-se bem próxima.

Levando em conta o Diâmetro Interno do Capilar de 1,35mm, a Carga de Refrigerante pode assumir uma faixa entre 220 a 240g para manter-se dentro da Região Alvo. O limite superior é restringido pelo Super Aquecimento, que passa a atingir valores muito baixos. Ultrapassar este limite, apesar de conduzir para o centro da região de máxima Capacidade Frigorífica, alto Coeficiente de Eficácia e boa Temperatura de Descarga, significa reduzir ainda mais o Super Aquecimento. Isto facilitaria o retorno de líquido para o compressor causando diversos inconvenientes que culminariam na sua falha. O Super Aquecimento também

delimita o limite inferior. Uma redução da Carga de Refrigerante que ultrapasse a Região Alvo, nos leva para setores de maior Super Aquecimento e também de menor Capacidade Frigorífica conduzindo-a para fora da sua região de máximo.

A terceira possibilidade para o Diâmetro Interno do Capilar é 1,63mm. A faixa da Carga de Refrigerante para manter o sistema dentro da Região Alvo com este diâmetro vai de 180 a 220g. Novamente o Super Aquecimento faz o delineamento destes limites tanto na parte superior quanto inferior. Ou seja, na parte superior incorremos no problema do retorno de líquido descrito no parágrafo anterior. Na parte inferior temos o problema do aumento do Super Aquecimento e a consequente redução da Capacidade Frigorífica. Entretanto, aqui temos também a Temperatura de Descarga em sua faixa limite e com um desvio padrão alto possibilitando a ocorrência de altas temperaturas. Portanto, para este diâmetro consideramos interessante trabalhar com Cargas de Refrigerante mais próximas do limite superior de 220g.

Portanto, verificamos que existem três situações em que o equipamento pode trabalhar adequadamente. Todas elas envolvem faixas diferentes de Carga de Refrigerante e uma delas considera uma faixa com quantidades maiores. ASHRAE (1979) sugere que a quantidade de Refrigerante deva ser mantida num valor mínimo, de modo consistente com um desempenho satisfatório. Não vemos uma razão, a não ser pelo uso de uma menor quantidade de refrigerante propriamente dita, que nos faça dar preferência pela condição de funcionamento com menor carga. A partir das análises feitas, constatamos até que esta condição de maior carga tem vantagens quanto a redução da variabilidade da Temperatura de Descarga.

Fora da Região Alvo temos sempre pelo menos um inconveniente que torna aquele setor desinteressante. Podemos dividir estas regiões em dois tipos; o primeiro envolve as consideradas proibitivas por conduzirem o compressor a uma falha precoce, e o segundo tipo são as que não oferecem riscos de falha, mas que concomitantemente não atingem altos índices de desempenho. Regiões em que a Temperatura de Descarga atinge valores muito altos é um dos casos proibitivos. Na FIGURA 51, tais regiões localizam-se nas faixas de altas Cargas de Refrigerante e pequenos Diâmetros Internos do Capilar, ou o inverso, baixas cargas e grandes diâmetros. Outro tipo de área considerada proibitiva é a correspondente aos baixos

valores de Super Aquecimento, a qual podemos identificar como a região de mínimo, levantada pela FIGURA 46. Considerando, agora, o outro tipo de região onde não temos condições proibitivas, podemos ressaltar três situações. A primeira com Diâmetro Interno do Capilar de 0,88mm e Carga de Refrigerante entre 180 a 290g. Este trecho experimenta Capacidades Frigoríficas mais baixas, saindo até mesmo da área de alto Coeficiente de Eficácia na medida em a Carga de Refrigerante vai sendo reduzida, e que neste sentido vai tendo também a Temperatura de Descarga diminuída. Portanto, especialmente próximo às baixas cargas temos uma condição que apesar de preservar o compressor, realiza um desempenho pobre. Para um diâmetro de 1,07mm e cargas entre 180 a 260g temos uma condição semelhante à anterior, mas com um desempenho um pouco melhor. E finalmente para o diâmetro de 1,35mm e cargas entre 180 a 200g temos novamente uma situação semelhante às anteriores com um desempenho um pouco melhor.

Também pudemos constatar que o método estatístico, de cunho exclusivamente empírico, apresentou resultados em total concordância com os fenômenos físicos envolvidos.

Observando a FIGURA 52 verificamos que a Temperatura de Descarga assume baixos valores em duas regiões distintas do gráfico, o que se dá pela manifestação de dois fenômenos. Na região superior direita a redução da Temperatura de Descarga coincide com a região de mínimo Super Aquecimento (conforme FIGURA 46). Este fato pode ser explicado através do Diagrama Pressão x Entalpia na FIGURA 88, onde dois níveis de Super Aquecimento são apresentados (Saq1 e Saq2) com suas respectivas Temperaturas de Descarga (T1 e T2). A redução do Super Aquecimento de Saq2 para Saq1 faz com que a curva de compressão desloque-se para a esquerda diminuindo a Temperatura de Descarga de T2 para T1. Na região inferior esquerda da FIGURA 52 outro fenômeno promove os baixos valores da Temperatura de Descarga. Aqui a Temperatura de Evaporação (FIGURA 77) ao sofrer uma redução, assim como a Temperatura de Condensação (FIGURA 83), traz a curva de compressão para a esquerda. Podemos verificar esta condição através do Diagrama Pressão x Entalpia apresentado na FIGURA 89. Nela a Temperatura de Evaporação, ao ser reduzida de T_{evap2} para T_{evap1} é acompanhada por uma redução da Temperatura de Condensação, de T_{cond2} para T_{cond1}, e com isso

traz a curva da compressão para a esquerda diminuindo a Temperatura de Descarga de T_2 para T_1 . É importante ressaltar que os fenômenos descritos ocorrem simultaneamente, de modo que um prevalece sobre o outro dependendo da região do gráfico a que nos referimos.

Outro aspecto revelado pelos resultados, que podemos verificar fisicamente, é a inter relação entre o aumento do Super Aquecimento e a diminuição da Capacidade Frigorífica. Na FIGURA 46 temos a localização da região onde o Super Aquecimento alcança seus menores valores, a qual se sobrepõe em grande parte à região de máxima Capacidade Frigorífica (FIGURA 30). Na medida que caminhamos para a parte inferior esquerda destes dois gráficos observamos um aumento do Super Aquecimento e uma redução da Capacidade Frigorífica.

Este fato pode ser explicado fisicamente pelo o aumento do Super Aquecimento, que ao elevar o volume específico do refrigerante preenche a camisa do pistão do compressor com uma menor quantidade de massa. Como consequencia a vazão de refrigerante que circula no sistema diminui, reduzindo sua Capacidade Frigorífica. O inverso também se verifica, ou seja, a diminuição do Super Aquecimento promove um aumento da Capacidade Frigorífica. Entretanto, se observarmos estas mesmas figuras no lado superior direito, verificaremos que apesar do Super Aquecimento ainda se encontrar em baixos níveis a Capacidade Frigorífica começa a cair, contrariando a afirmação anterior. Entretanto, nesta região estamos diante de um fato novo, ou seja, o Super Aquecimento atingiu valores tão baixos que está ocorrendo retorno de líquido para o compressor. A diminuição da Capacidade Frigorífica, neste caso, se dá pelo fato de que parte do refrigerante que deveria estar evaporando no evaporador, o está fazendo no compressor.

O comportamento do Sub Resfriamento (FIGURA 60 a FIGURA 65) mostrou-se interessante ao revelar que aumentando a Carga de Refrigerante e reduzindo o Diâmetro Interno do Capilar, ocorre um aumento do Sub Resfriamento. Este comportamento se baseia no aumento da diferença entre as pressões de Condensação e Evaporação provocado pela redução do Diâmetro Interno do Capilar. A Carga de Refrigerante potencializa esta diferença estimulando o aumento da Temperatura de Condensação. Com esta temperatura muito acima da ambiente temos uma condição propícia para formação do Sub Resfriado conforme constatamos nos

resultados. Mas o que predomina nestas figuras é a ocorrência de um patamar central onde o Sub Resfriamento assume valores na faixa de 20 a 22°C, e que coincide em boa parte com a região de máxima Capacidade Frigorífica (FIGURA 30). Tal condição é confirmada pelo ASRHAE (1979), que apesar de não citar valores, comenta que é possível que uma condição de máximo desempenho possa ser obtida quando há um considerável Sub Resfriamento na entrada do elemento de expansão.

O Tubo Capilar quando submetido a altos diferenciais de pressão, pode estar sujeito a um fenômeno denominado escoamento bloqueado. O diferencial de pressão aplicado ao capilar determina a vazão de refrigerante que o atravessa. Quanto maior for este diferencial maior será a vazão. Entretanto, numa dada situação o aumento deste diferencial não causa mais o crescimento da vazão, neste ponto o escoamento atingiu a condição de bloqueado. Na ocorrência deste fenômeno, uma vez definidas as condições na entrada do capilar, existe uma pressão de saída abaixo da qual não ocorre um aumento significativo da vazão. Esta pressão é conhecida por Pressão Crítica. A TABELA 40 apresenta os valores das Pressões Críticas calculadas para os experimentos realizados na Fase 3, segundo o método descrito pelo ASHRAE (1979). Constatamos que a pressão de evaporação, a qual consideramos ser a de saída do capilar, é menor que a crítica para todos os ensaios, indicando a condição de escoamento bloqueado. A vazão nestas condições passa não mais a depender da pressão de saída e sim das dimensões do capilar e das condições do refrigerante na sua entrada. Portanto, apesar de estarmos sempre numa condição de escoamento bloqueado, a vazão de refrigerante varia de acordo com estes parâmetros, conforme cada experimento. Podemos então dizer que numa condição de escoamento bloqueado, e dentro dos limites estudados, a influência do Comprimento do Tubo Capilar é bem menor do que a do seu Diâmetro, conforme verificamos ao longo deste trabalho.

TABELA 40 – Pressões Críticas determinadas para os experimentos da Fase 3.

Ensaio Nro	[kPa] abs		Ensaio Nro	Réplica [kPa] abs	
	Pevap	Pcrit		Pevap	Pcrit
24	294	620	40	329	655
25	494	930	41	522	999
26	246	413	42	274	482
27	446	723	43	487	792
28	515	930	44	497	930
29	535	1034	45	542	1068
30	425	723	46	391	689
31	532	861	47	535	827
32	515	1137	48	508	861
33	515	861	49	508	861
34	535	930	50	535	896
35	384	723	51	353	620
36	501	723	52	497	723
37	515	1068	53	528	1137
38	535	930	54	542	965
39	218	620	55	239	517

FIGURA 88 – Diagrama Pressão x Entalpia demonstrando a relação entre o Super Aquecimento e a Temperatura de Descarga.

FIGURA 89 – Diagrama Pressão x Entalpia demonstrando a relação entre a Temperatura de Descarga e a Temperatura de Evaporação.

FIGURA 90 – Curva de Nível representando a região de máxima Capacidade Frigorífica.

FIGURA 91 – Curva de Nível representando a interseção entre a área de máxima Capacidade Frigorífica e a região de melhor Coeficiente de Eficácia.

FIGURA 92 – Curva de Nível representando a interseção entre a área de máxima Capacidade Frigorífica e as regiões de melhor Coeficiente de Eficácia e Super Aquecimento.

FIGURA 93 – Curva de Nível representando a interseção entre a área de máxima Capacidade Frigorífica e as áreas de melhor Coeficiente de Eficácia, Super Aquecimento e temperatura de Descarga.

7 - CONCLUSÕES, COMENTÁRIOS E SUGESTÕES

A Carga de Refrigerante e as Dimensões do Capilar, que proporcionam ao sistema frigorífico as maiores Capacidades Frigoríficas, foram determinadas. Os resultados também consideraram a eficiência do equipamento visando a melhor condição para o Coeficiente de Eficácia. E na intenção de proteger o sistema contra falhas prematuras do compressor, a solução também levou em conta condições de funcionamento que mantiveram limites adequados para a Temperatura de Descarga e o Super Aquecimento. Através do mapeamento levantado pelas Superfícies de Resposta e Curvas de Nível para os parâmetros acima, foram ressaltadas as condições de funcionamento mais interessantes. Neste sentido foram selecionadas as seguintes soluções: para os Diâmetros Internos do Capilar, 1,07mm, 1,35mm e 1,63mm com as respectivas faixas de Carga de Refrigerante, 270 a 310 g, 220 a 240g e 180 a 220g. Outras possibilidades além dessas nos remetem a dois tipos de casos. Os proibitivos onde o sistema não deve trabalhar, pois o compressor estará sob alto risco de falha precoce, e os casos em que o compressor estará preservado, mas o sistema desenvolverá uma baixa Capacidade Frigorífica com um baixo Coeficiente de Eficácia. Extendendo a análise foram levantadas as Superfícies de Resposta para a Vazão de Refrigerante, a Temperatura de Evaporação, a Temperatura de Condensação e o Sub Resfriamento, que revelaram peculiaridades bastante interessantes, em especial desta última.

O comportamento de tubos capilares, apesar de bastante estudado pela literatura, aborda em sua grande maioria o componente de uma forma isolada. O enfoque do sistema frigorífico como um todo, adotado neste trabalho, contribuiu de forma inestimável para o entendimento do seu comportamento frente as alterações desferidas no Elemento de Expansão e na Carga de Refrigerante.

A sensibilidade do sistema perante as variáveis independentes foi determinada, e revelou que o Diâmetro do Capilar e a Carga de Refrigerante exercem

uma grande influência sobre o equipamento com relação às oito variáveis resposta avaliadas. Constatamos que o Comprimento do Capilar demonstrou ter um efeito praticamente insignificante perante todas as respostas estudadas. Podemos dizer que numa condição de escoamento bloqueado, verificada em todos os ensaios da Fase 3, constatamos que o Diâmetro do Capilar exerce uma influência bem maior do que o seu Comprimento, dentro das faixas abordadas.

A metodologia desenvolvida para chegarmos ao mapeamento, anteriormente descrito, pode ser aproveitada na elaboração de uma estratégia de controle automático para sistemas frigoríficos. Sensores podem determinar a real condição de funcionamento do equipamento e compará-la com uma situação ótima previamente mapeada. Havendo divergência um atuador agiria sobre o sistema procurando eliminá-la, conduzindo à situação ideal. Tal estratégia é inspirada nos controles eletrônicos largamente usados no comando de motores automotivos.

As oito variáveis resposta tiveram seus erros experimentais levantados, sendo que a faixa de variação alcançou um mínimo de 1,3% para a Temperatura de Evaporação e um máximo de 9,4% para a Temperatura de Descarga.

A análise de robustez do sistema revelou os níveis das variáveis independentes que atribuíram uma menor variabilidade a algumas variáveis resposta. A Capacidade Frigorífica e o Super Aquecimento assumem uma menor variabilidade quando o Diâmetro do Capilar e a Carga de Refrigerante adquirem simultaneamente valores em torno de 1,07mm e 212,5g, ou 1,63mm e 312,5g. A Temperatura de Descarga admite uma menor variabilidade quando o Comprimento do Capilar e a Carga de Refrigerante valem simultaneamente em torno 3m e 312,5g ou 2m e 212,5g. O Coeficiente de Eficácia adquire uma menor variabilidade quando o Diâmetro do Capilar é próximo a 1,63mm. Este tipo de informação indica os níveis nos quais uma variável resposta está menos sujeita à variações a partir de certas variáveis independentes. Uma fonte de variabilidade comum nos meios de produção de equipamentos frigoríficos é a Carga de Refrigerante. Supondo que o sistema aqui estudado fosse ser fabricado seria interessante projetá-lo com um capilar de 3m e uma carga 312,5g, pois neste caso variações na Carga de Refrigerante afetariam o mínimo possível a variabilidade da Temperatura de Descarga. Em outros níveis esta

temperatura poderia assumir uma grande variabilidade e alcançar valores prejudiciais para o compressor.

Pudemos constatar também que o comportamento revelado pelas diversas Superfícies de Resposta e Curvas de Nível, mostraram-se em total acordo com os fenômenos físicos de Transferência de Calor e Massa envolvidos no funcionamento do sistema frigorífico, indicando uma coerência dos resultados.

Todas as conclusões foram aqui obtidas a partir de 55 ensaios realizados, comprovando a eficiência inerente ao método empregado. Tal característica deve ser motivo de atenção dos profissionais da área experimental, tendo em vista que é muito comum encontrar trabalhos na literatura que relatam orgulhosamente ter levantado enormes quantidades de dados. Entretanto conclusões abrangentes e efetivas são obtidas com dados estrategicamente levantados e não necessariamente com grandes quantidades.

As diversas conclusões aqui apresentadas demonstram o potencial do método de Superfície de Resposta e Planejamento de Experimentos para o avanço dos procedimentos de projeto e análise de sistemas térmicos. A valiosa contribuição dos resultados obtidos, especialmente para o segmento de desenvolvimento de Sistemas de Refrigeração, pode promover uma nova linha de trabalho ao setor, que praticamente não conhece os benefícios dos métodos Estatísticos disponíveis para as práticas experimentais. Terminamos com a esperança de estar colaborando para, no mínimo, chamar a atenção para esta vertente promissora especialmente nos dias atuais onde o país necessita do máximo de resultados efetivos com o mínimo de tempo e recursos.

O desenvolvimento deste trabalho não encerrou, de modo algum, o tema em questão. Na verdade sentimos que uma nova vertente está por se desenvolver, e neste sentido sugerimos os seguintes trabalhos futuros,

- Desenvolvimento de um modelo matemático para o sistema que aqui abordamos, levantando resultados simulados nas mesmas condições ensaiadas, e comparando os dados teóricos com os experimentais,
- Inclusão da Temperatura Ambiente como uma variável independente controlada,
- Como a faixa da Temperatura de Condensação que aqui trabalhamos é relativamente alta, poderíamos baixá-la com a redução do compressor ou

aumento o condensador, ou ambos. Para isso sugerimos a inclusão destes dois componentes ao planejamento pelo acréscimo de efeitos de bloco,

- Inclusão do ponto de funcionamento do sistema como outra variável independente. Este trabalho seria de grande interesse no estudo da questão do grau de susceptibilidade de sistemas frigoríficos, que utilizam tubo capilar, quanto a variações da carga térmica,
- Implementação do intervalo de incerteza no levantamento das Superfícies de Resposta, por exemplo, conforme artigo de BISGAARD & ANKENMAN (1996).
- Implementação do intervalo de incerteza no método de busca do ponto estacionário.
- Desenvolver modelos matemáticos mais elaborados que obtenham menores erros por falta de ajuste para os dados aqui levantados.

8 - ANEXO

Calibrações

A TABELA 41 traz os dados levantados na para a calibração dos sensores utilizados. A calibração foi feita através de um ajuste dos valores referência em função dos valores lidos. Todos os detalhes são apresentados a seguir para cada calibração.

TABELA 41 - Dados levantados para a calibração dos sensores.

Sensores de Temperatura					Sensores de Pressão			
Temperatura Referência	Sinal Digital [bits]				Manômetro de Baixa		Manômetro de Alta	
	Valores Lidos				kPa	kPa	kPa	kPa
	01	02	03	04	Pressão Lida	Pressão Referência	Pressão Lida	Pressão Referência
89,9	3353	3347	3345	3338	0,0	0,0	517,1	490,3
85,0	3283	3276	3275	3270	96,5	98,1	1068,7	980,7
80,1	3213	3206	3204	3199	196,5	196,1	1620,3	1471,0
75,0	3140	3133	3131	3128	289,6	294,2	2171,8	1961,3
69,9	3069	3063	3062	3059	393,0	392,3	2723,4	2451,7
65,0	2998	2992	2992	2988	499,9	490,3	3240,5	2942,0
60,0	2926	2921	2919	2919	606,7	588,4		
55,0	2855	2850	2848	2849	710,2	686,5		
50,0	2784	2777	2777	2777	813,6	784,5		
45,0	2711	2706	2705	2708				
40,0	2642	2633	2632	2636				
35,0	2568	2564	2562	2567				
30,0	2497	2490	2489	2496				
25,0	2424	2419	2417	2425				
20,0	2352	2345	2345	2353				
15,0	2280	2275	2274	2280				
10,1	2208	2201	2200	2210				
5,0	2135	2130	2128	2137				
0,0	2059	2056	2053	2066				
-5,0	1987	1984	1981	1993				
-10,0	1913	1911	1909	1921				
-14,9	1841	1839	1833	1848				
-20,0	1767	1767	1764	1777				
-25,0	1692	1693	1689	1705				
-30,0	1622	1623	1616	1635				

Sensor de Temperatura 01.

Equação de Calibração:

$$y = b_0 + b_1.x + b_2.x^2$$

y = valor calibrado da temperatura [°C]

x = valor do sinal gerado pelo computador [bits]

$$b_2 = 8,75E-07$$

$$b_1 = 0,064857306$$

$$b_0 = -137,344086$$

Desvio Padrão = 0,07°C

FIGURA 94 – Resíduo da equação de calibração para o sensor de temperatura 01.

Sensor de Temperatura 02.

Equação de Calibração:

$$y = b_0 + b_1 \cdot x + b_2 \cdot x^2$$

y = valor calibrado da temperatura [°C]

x = valor do sinal gerado pelo computador [bits]

$$b_2 = 5,40\text{E-}07$$

$$b_1 = 0,066792479$$

$$b_0 = -139,666188$$

Desvio Padrão = 0,08°C

FIGURA 95 – Resíduo da equação de calibração para o sensor de temperatura 02.

Sensor de Temperatura 03.

Equação de Calibração:

$$y = b_0 + b_1 \cdot x + b_2 \cdot x^2$$

y = valor calibrado da temperatura [°C]

x = valor do sinal gerado pelo computador [bits]

$$b_2 = 7,99\text{E-}07$$

$$b_1 = 0,065375909$$

$$b_0 = -137,677511$$

Desvio Padrão = 0,09°C

FIGURA 96 – Resíduo da equação de calibração para o sensor de temperatura 03.

Sensor de Temperatura 03.

Equação de Calibração:

$$y = b_0 + b_1 \cdot x + b_2 \cdot x^2$$

y = valor calibrado da temperatura [°C]

x = valor do sinal gerado pelo computador [bits]

$$b_2 = 9,00\text{E-}07$$

$$b_1 = 0,06586639$$

$$b_0 = -139,930935$$

Desvio Padrão = 0,09°C

FIGURA 97 – Resíduo da equação de calibração para o sensor de temperatura 04.

Sensor de Baixa Pressão.

(Manômetro Inperial Eastman)

Equação de Calibração (pressões relativas):

$$y = b_0 + b_1 \cdot x + b_2 \cdot x^2$$

y = valor calibrado [kPa]

x = valor lido no instrumento [kPa]

$$b_2 = -7,51\text{E-}05$$

$$b_1 = 1,02188618$$

$$b_0 = 0$$

Desvio Padrão = 2,7 kPa

FIGURA 98 - Resíduo da equação de calibração para o sensor de baixa pressão.

Sensor de Alta Pressão.

(Manômetro Imperial Eastman)

Equação de Calibração (pressões relativas):

$$y = b_0 + b_1 \cdot x + b_2 \cdot x^2$$

y = valor calibrado [kPa]

x = valor lido no instrumento [kPa]

$$b_2 = 9,1691\text{E-}06$$

$$b_1 = 0,86238343$$

$$b_0 = 45,2324344$$

Desvio Padrão = 6,0 kPa

FIGURA 99 - Resíduo da equação de calibração para o sensor de alta pressão.

9 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABERNETHY, R. B.; BENEDICT, R. P.; DOWDELL, R. B. (1985). ASME Measurement Uncertainty. . *Transactions of the ASME – Journal of Fluids Engineering*, v. 107, p. 161-164.

AL-FAHED, S.; CHAMRA, L. M.; CHAKROUN, W. (1999). Pressure Drop and Heat Transfer Comparison for both Microfilm Tube and Twisted-Tape Inserts in Laminar Flow. *Experimental Thermal and Fluid Science*, v.18, p. 323-333.

AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATION AND AIR CONDITIONING ENGINEERS INC. Fundamentals Handbook. Chapter 17: Refrigerant Tables and Charts. Atlanta, GA, 1981.

AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATION AND AIR CONDITIONING ENGINEERS INC. Equipment Handbook. Chapter 20: Refrigerant Control Devices. Atlanta, GA, 1983.

ANSCOMBE, F. J.; TUKEY, J. W. (1963). The Examination and Analysis of Residuals. *Technometrics*, v. 5, n. 2, p. 141-160.

ARDAYFIO, D. D. (2000). Principles and Practices of Design Innovation. *Technological Forecasting and Social Change*, v.64, p. 155-169.

BANSAL, P. K.; RUPASINGHE, A. S. (1998). An Homogeneous Model for Adiabatic Capillary Tubes. *Applied Thermal Engineering*, v. 18, n. 3-4, p. 207-219.

BEITELMAL, A. H.; SAAD, M.; PATEL, C. (2000). The Effect of Inclination on the Heat Transfer Between a Flat Surface and an Impinging Two-Dimensional air Jet. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, v.21, p. 156-163.

BISGAARD, S.; ANKENMAN, B. (1996). Standard Errors for the Eigenvalues in Second-Order Response Surface Models. *Technometrics*, v. 38, n. 3, p. 238-246.

BISGAARD, S.; STEINBERG, D. M. (1997). The Design and Analysis of 2^{k-p} Prototype Experiments. *Technometrics*, v. 39, n. 1, p. 52-62.

BOX, G. E. P.; BEHNKEN, D.W. (1960). Some New Three Level Designs for the Study of Quantitative Variables. *Technometrics*, v. 2 n. 4, p. 455-475.

BOX, G. E. P.; BISGAARD, S (1988). Statistical Tools for Improving Designs. *Mechanical Engineering*.v. 110, n. 1, p. 32-40, January.

BOX, G. E. P.; DRAPER, N. R. (1987). *Empirical Model Building and Response Surfaces*. New York, John Wiley&Sons.

BOX, G. E. P.; HUNTER, W. G.; HUNTER, J. S. (1978) *Statistics for Experimenters*. New York, John Wiley & Sons.

CAFEU, J. A.; THOMAS, R. S. (1997). The Use of Statistical Tools to Contend with Variability in Engineering. *Experimental Techniques*, p. 26-28, Sep/Oct.

CHAKROUN, W. M.; ABDEL-RAHMAN, A. A.; AL-FAHED, S. F. (1998). Heat Transfer Augmentation for Air Jet Impinged on a Rough Surface. *Applied Thermal Engineering*, v.18, p. 1225-1241.

CHEN, W.; TSUI, K. -L.; MISTREE, J. K. A. F. (1995). Integration of the Response Surface Methodology with the Compromise Decision Support Problem in Developing a General Robust Design Procedure. In: 1995 DESIGN ENGINEERING

TECHNICAL CONFERENCE, Boston, 1995. Design Engineering Division, v. 82, n. 1, p. 485-492.

CHEN, Y. -M.; WANG, K. -C. (1998). Experimental Study on the Forced Convective Flow in a Channel with Heated Blocks in Tandem. *Experimental Thermal and Fluid Science*, v. 16, p. 286-298.

CHOUDHURY, I. A.; EL-BARADIE, M. A. (1999). Machinability Assessment of Inconel 718 by Factorial Design of Experiment Coupled with Resposnse Surface Methodology. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 95, p. 30-39.

COLEMAN, H. W.; STEELE, W. G. (1989). *Experimentation and Uncertainty Analysis for Engineers*. John Wiley & Sons, New York.

CROSS, N. (1993). Science and Design Methodology: A Review. *Research in Engineering Design*, v. 5, p. 63-69.

DHAR, M. (1978). *Transient Analysis of Refrigeration System*. Purdue. 314p. Ph.D. Thesis – Faculty of Purdue University

DOMANSKI, P. A.; DIDION, D. A.; DOYLE, J. P. (1994). Evaluation of Suction-Line/Liquid-line Heat Exchange in the Refrigeration Cycle. *International Journal of Refrigeration*, v. 17, n. 7, p. 487-493.

DOLBY, J. L. (1963). A Quick Method for Choosing a Transformation. *Technometrics*, v. 5, n. 3, p. 317-325.

DRAPER, N. R.; HUNTER, W. G. (1969). Transformations: Some Examples Revisited. *Technometrics*, v. 11, n. 1, p. 23-41.

DRAPER, N. R.; DAVIS, T.P.; POZUETA, L.; GROVED. M. (1994). Isolation of Degrees of Freedom for Box-Behnken Designs. *Technometrics*, v. 36 n. 3, p. 283-291.

ESCOBAR, L. A.; MEEKER, W. Q. (1995). Planning Accelerated Life Test with Two or More Experimental Factors. *Technometrics*, v. 37, n. 40, p. 411-427.

FANG, L.; HARRIS, D. K.; GOLDSCHMIDT, V. W. (2000). Heat Transfer of a U-bend in a Cross Flow of Air at Different Angles of Incidence. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v. 43, p. 3053-3059.

GOLDSCHMIDT, V. W. (1991). Modeling od Steady Flows of R-22 Through Capillary Tubes. In: ASHRAE WINTER MEETING, New York. ASHRAE Transactions pt 1. Publ by ASHRAE, Atlanta, p. 139-148.

GROWING PAINS OF THE INTERNET. (1999). /Editorial/. Business Week. October.

GU, P. P.; THOMAS, R.; LEE, J.; KUO, E.; GECK, P. (1998). Application of Variance Components Analysis for Improving Acoustic Reciprocity Measurement Quality.

GUISSET, P.; TZANNETAKIS, N. (1997). Numerical Methods for Modeling and Optimization of Noise Emission Applications. 1997 ASME INTERNATIONAL MECHANICAL ENGINEERING CONGRESS AND EXPOSITION, Dallas. ASME Noise Control and Acustics Division. v. 24, p. 315-322.

HANN, G.; HOEL, R. (1998). Key Challenges for Statisticians in Business and Industry. *Technometrics*, v. 40, n. 3, p. 195-200.

JAMES, C. A.; TAYLOR, R. P.; HODGE, B.K. (1995). The Application of Uncertainty Analysis to Cross-Flow Heat Exchanger Performance. *Heat Transfer Engineering*, v. 16, n. 4 p. 50-62.

JANAJREH, I. M.; HELLER, R. A. (1993). Na Efficient Reliability Technique to Study the Performance of Rocket Motors. Reliability, Stress Analysis, and Failure Prevention. v. 55, p. 23-30.

KEMPTHORNE, O. (1973) *Design and Analysis of Experiment*. Robert E. Krieger Publishing Company. Chapter: Introduction.

KLINE, S. J. (1985). 1983 Symposium on Uncertainty Analysis Closure. *Transactions of the ASME – Journal of Fluids Engineering*, v. 107, p. 181-182.

KLINE, S. J. (1985). The Purposes of Uncertainty Analysis. *Transactions of the ASME – Journal of Fluids Engineering*, v. 107, p. 153-160.

KLINE, S. J.; McCLINTOCK, F. A. (1953). Describing Uncertainties in Single Sample Experiments. *Mechanical Engineering*, v. 75, p. 3-8.

KWANG, A. Y.; GSCHWEND, K.; BANERJEE, B. (1994). Methodology for Response Surface Representation of Low Cycle Fatigue Behavior of PLCC and (P)QFP Surface Mount Devices. *Structural Analysis in Microelectronics and Fiber Optics*, v. 8, p.47-53.

KWEON, Y. C.; KIM, M. H. (2000). Experimental Study on Nucleate Boiling Enhancement and Bubble Dynamic Behavior in Saturated Pool Boiling Using a Nonuniform DC Electric Field. *International Journal of Multiphase Flow*, v. 26, p. 1351-1368.

LASSAHN, G. D. (1985). Uncertainty Definition. *Transactions of the ASME – Journal of Fluids Engineering*, v. 107, p. 179-180.

- LAU, S.; MEIRITZ, K.; RAM, V. I. V. (1999). Measurement of Momentum and Heat Transport in the Turbulent Channel Flow with Embedded Longitudinal Vortices. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, v. 20, p. 128-141.
- LAWRANCE, T. H. A.; DAVIS, T. P. (1998). Engine-Mapping Experiments: A Two-Stage Regression Approach. *Technometrics*, v. 40, n. 2, p. 120-126.
- LEE, H.W.; JONES, J. W. (1997). Analytical Model of a Residential Desuperheater. *Applied Energy*, v. 57, n. 4, p. 271-285.
- LIN, C. C.; KWOK, C. C. K.; LI, R. -Y.; CHEN, Z. -H.; CHEN, Z. -Y. (1991) Local Frictional Pressure Drop During Vaporization of R-12 Through Capillary Tubes. *International Journal of Multiphase Flow*, v. 17, n. 1, p. 95-102.
- LIU, T. -M.; CHEN, C. C. (1999). Heat Transfer in a Rotating Two-Pass Smooth Passage with a 180° Rectangular Turn. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v. 42, p. 231-247.
- LUST, R. V.; WU, Y. -T. J. (1998). Probabilistic Structural Analysis - An Introduction. *Experimental Techniques*, p. 29-32, Sep/Oct.
- MATHEW, J., RAMAKRISHNAN, N. K., NAIK, N. K. (1999). Trepanning on Unidirectional Composites: Delamination Studies. *Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing*, v. 30, p. 951-959.
- MELO, C.; FERREIRA, R. T. S.; BOABAID NETO, C.; GONÇALVES, J. M.; MEZAVILA, M. M. (1999). An Experimental Analysis of Adiabatic Capillary Tubes. *Applied Thermal Engineering*, v. 19, p. 669-684.

MOFFAT, R. J. (1982). Contributions to the Theory of Single Sample Uncertainty Analysis. *Transactions of the ASME – Journal of Fluids Engineering*, v. 104, p. 250-260.

MOFFAT, R. J. (1985). Using Uncertainty Analysis of an Experiment. *Transactions of the ASME – Journal of Fluids Engineering*, v. 104, p. 250-260.

MONTGOMERY, D. C. (1997). *Design and Analysis of Experiments*. 4th Edition. New York, John Wiley & Sons.

MURPHY, A. P.; LICHTWARDT, M. A.; BISGAARD, S. (1998). Novel Methods for Generating and Treating Air Supersaturated Water. In: 1998 ASME FLUIDS ENGINEERING DIVISION SUMMER MEETING, Washington, DC, 1998. Proceedings of the 1998 ASME Fluids Engineering Division. p. 1-6.

NELSON, W. (1990). *Accelerated Testing: Statistical Models, Test Plans, and Data Analysis*. John Wiley & Sons.

NWOSU, H. U. (1989) Designing Computer Rigid Disk Drives to Withstand Mechanical Shock and Vibration. 1989 ASME DESIGN TECHNICAL CONFERENCE – 12th BIENNIAL CONFERENCE ON MECHANICAL VIBRATION AND NOISE, Montreal. ASME Design Engineering Division, New York. v. 4-18, p. 15-22.

OLIVEIRA S. J. (1996). *Simulação de um Sistema Refrigerante em Regime Permanente*. São Carlos. 123p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

PAEZ, T. L.; HUNTER, N. F. (1998). Fundamental Concepts of the Bootstrap for Statistical Analysis of Mechanical Systems. *Experimental Techniques*, p. 35-38, May/Jun.

POWELL, R. E. (1997). Distribution of Spatial Variability in Vibration Response. *Experimental Techniques*, p. 33-35, Nov/Dec.

QU, W.; MALA, G. M.; LI, D. (2000). Heat Transfer for Water Flow in Trapezoidal Silicon Microchannels. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v. 43, p. 3925-3936.

RADSON, D.; HERRIN, G. D. (1995). Augmenting a Factorial Experiment When One Factor is an Uncontrollable Random Variable: A Case Study. *Technometrics*, v. 37, n. 1, p. 70-81.

RIZZO, A. R. (1994). Quality Engineering with FEA and DOE. *Mechanical Engineering*, v. 116, n.5, p. 76-78, May.

ROOD, E. P.; TELIONIS, D. P. (1991). Editorial. *Transactions of the ASME – Journal of Fluids Engineering*, v. 113, p. 313-314.

ROSLUND, J. (1998). How to Perform a Designed Experiment (DOE). *Experimental Techniques*, p. 31-34, Mar/Apr.

RUIZ, F.; CHIGIER, N. A. (1987). Design Uncertainty Analysis of a Series of Atomization Experiments in Seven Variables. In: WINTER ANNUAL MEETING OF THE AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERING, Boston, 1987. *ASME - Fluids Engineering Division*, New York, v. 58, p. 45-56.

SAMI, S. M.; TRIBES, C. (1998). Numerical Prediction of Capillary Tube Behavior with Pure and Binary Alternative Refrigerants. *Applied Thermal Engineering*, v. 18, n. 6, p. 491-502.

SMIT, R. E.; WEHOFFER, S. (1985). From Measurement Uncertainty to Measurement Communications, Credibility, and Cost Control in Propulsion Ground

Test Facilities. *Transactions of the ASME – Journal of Fluids Engineering*, v. 107, p. 165-172.

SOCOVIC, M.; BAHOR, M. (1998). On the Inter-Relationships of some Machinability Parameters in Finish Machining with Cermet TiN (PVD) Coated Tools. *Journal of Materials Processing Technology*. v. 78, p. 163 - 170.

SPRINGER, M. E.; THOLE, K. A. (1998). Experimental Design for Flowfield of Louvered Fins. *Experimental Thermal and Fluid Science*, v. 18, p. 258-269.

STOECKER, W. F. (1985). *Refrigeração e Ar Condicionado*. McGraw Hill do Brasil, Ltda. Capítulo 13: Dispositivos de Expansão.

STOECKER, W. F. (1988). *Industrial Refrigeration*. Michigan, Business News Publishing CO. Chapter 4: Reciprocating Compressors.

STEELE, W. G.; COLEMAN, H. W. (1985). Uncertainty Analysis in the Planning and Design of an Experiment. In: WINTER ANNUAL MEETING OF THE ASME. Boston, 1985. *ASME – Fluids Engineering Division*. New York, v. 58, p. 63-67.

TAYLOR, R. P.; HODGE, B.K.; JAMES, C. A. (1999). Estimating uncertainty in thermal systems analysis and design. *Applied Thermal Engineering*, v. 19, p. 51-73.

THE 21th CENTURY: WHAT IF ...? (1999). /Editorial/. Business Week. August.

TRAN, T. N.; CHYU, M. -C.; WAMBSGANSS, M. W.; FRANCE, D. M. (2000). Two-Phase Pressure Drop of Refrigerants During Flow Boiling in Small Channels: an Experimental Investigation and Correlation Development. *International Journal of Multiphase Flow*, v. 26, p. 1739-1754.

WANG, J.; WU, Y. (1990). Start-up and Shut Down Operation in a Reciprocating Compressor Refrigeration System with Capillary Tubes. *International Journal of Refrigeration*, v. 13, p. 187-190.

WANG, T.; ZHOU, D. (1998). Conditionally Sampled Flow and Thermal Behavior of a Transitional Boundary Layer at Elevated Free-Stream Turbulence. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, v. 19, p. 348-357.

WONG, T. N.; OOI, K. T. (1995). Refrigerant Flow in Capillary Tube: an Assesment of the Two-Phase Viscosity Correlations on Model Prediction. *International Communication of Heat and Fluid Flow*, v. 22, n. 4, p. 595-604.

WONG, T. N.; OOI, K. T. (1996). Adiabatic Capillary Tube Expansion of the Homogeneous Flow and the Separated Flow Models. *Applied Thermal Engineering*, v. 16, n. 7, p. 625-634.

WANG, Y.; AMIRI, A.; VAFAI, K.; (1999). An Experimental Investigation of Melting Process in a Rectangular Enclosure. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v. 42, p. 3659-3672.

YAN, Y. -Y.; LIO, H. -C.; LIN, T. -F. (1999). Condensation Heat Transfer and Pressure Drop of Refrigerant R-134a in a Plate Heat Exchanger. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v. 42, p. 993-1006.

YAN, Y. -Y.; LIN, T. -F. (1998). Evaporation Heat Transfer and Pressure Drop of Refrigerant R-134a in a Small Pipe. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v. 41, p. 4183-4194.

YAN, Y. -Y.; LIN, T. -F. (1999). Condensation Heat Transfer and Pressure Drop of Refrigerant R-134a in a Small Pipe. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v. 42, p. 697-708.

YIN, C. -P.; YAN, Y. -Y.; LIN, T. -F.; YANG, B. -C. (2000). Subcooled Flow Boiling Heat Transfer of R134a and Bubble Characteristics in a Horizontal Annular Duct. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v. 43, p. 1885-1896.