

MODELAGEM SEMI - EMPÍRICA DE COMPRESSORES HERMÉTICOS ALTERNATIVOS

Fabio Renato Camargo Sirbone

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Antônio Moreira dos Santos

Co-orientador: Prof. Dr. Luben Cabezas Gómez

São Carlos

2007

Para Gabriela, minha esposa, pelo seu carinho, compreensão, dedicação, amor e incentivo durante minha jornada.

AGRADECIMENTOS

A Tecumseh do Brasil Ltda. por fornecer a estrutura e recursos na realização do projeto.

Ao meu Diretor Leonelo A . Calciolari e Gerente de Engenharia Enio S. R. Freitas pela paciência, incentivo e disponibilidade do tempo e recursos da empresa.

Aos Professores Doutor Antônio Moreira dos Santos, Doutor Sergio R. Fontes, Doutor Oscar M. H. Rodriguez e Doutora Ruth Gouvêa pelos ensinamentos e fundamental contribuição para o desenvolvimento do projeto.

A Escola de Engenharia de São Carlos – EESC USP – por colocar a minha disposição toda sua estrutura.

Ao Professor Doutor Luben Cabezas Gómez pelos seus ensinamentos, dedicação e orientação.

A todos meus amigos e colegas de trabalho que me ajudaram e incentivaram no desenvolvimento do projeto.

Ao funcionário Carlos Alberto Maragno do Departamento de Engenharia Mecânica da USP – São Carlos por acreditar e ajudar na realização do meu projeto.

Se você conhece o inimigo e conhece a si mesmo, não precisa temer o resultado de cem batalhas. Se você se conhece mas não conhece o inimigo, para cada vitória ganha sofrerá também uma derrota. Se você não conhece nem o inimigo nem a si mesmo, perderá todas as batalhas.

(Sun Tzu, A arte da Guerra)

RESUMO

Sirbone. F.R.C. (2007) MODELAGEM SEMI - EMPÍRICA DE COMPRESSORES HERMÉTICOS ALTERNATIVOS, Dissertação de mestrado – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos 2007.

Neste trabalho aplica-se um método semi-empírico que utiliza uma técnica de otimização não linear para determinação das eficiências volumétrica e combinada do compressor hermético alternativo. Relações para estimar aproximadamente o fluxo de massa e a potência elétrica do compressor também são propostas. Todas estas características do compressor são calculadas através das relações físicas do modelo, empregadas nos cálculos de otimização. O método é implementado no software EES (*Engineering Equation Solver*) e baseia-se nos trabalhos de Jahing (1999) e Jahing et al. (2000). No presente método, quatro medições experimentais do fluxo de massa e potência elétrica são suficientes para determinar os parâmetros de ajuste do modelo. Este procedimento permite a geração de mapas de compressores satisfatórios sem a necessidade de um maior número de dados experimentais como no caso da norma ARI 540. Estes resultados obtidos com o modelo podem ser usados para o projeto de novos compressores.

Palavras-chave: Compressor, Compressor hermético, Modelo semi-empírico.

ABSTRACT

Sirbone. F.R.C. (2007) SEMI-EMPIRICAL MODELLING OF ALTERNATIVE HERMETIC COMPRESSORS. M.Sc Dissertation – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos 2007.

In the present work is applied a semi-empirical method that uses a non-linear optimization technique for determination of the volumetric and combined efficiencies of hermetic reciprocating compressor. Relations to approximately estimate the mass flow and the electric power of the compressor are also proposed. All these compressor characteristics are calculated through physical model relations, used in the optimization calculations. The method is implemented in the EES (Engineering Equation Solver) software and is based on the works of Jahing (1999) and Jahing et al. (2000). In the method, four experimental measurements of the mass flow and electric power are enough to determine the fitting parameters of the model. This procedure allows the generation of satisfactory compressor maps without the necessity of a higher number of experimental data, as in the case of norm ARI 540 application. The results obtained with the model can be used for the project of new compressors.

Keywords: Compressor, Hermetic compressor, Semi-empirical model.

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Faixa de aplicação de compressores	29
Tabela 4.1 – Dados experimentais de calorímetro de um compressor modelo A ...	71
Tabela 4.2 – Dados experimentais de calorímetro de um compressor modelo B ...	71
Tabela 4.3 – Dados experimentais de calorímetro de um compressor modelo C ...	72
Tabela 4.4 – Resultados utilizando 8 pontos experimentais para o compressor modelo A	73
Tabela 4.5 – Resultados utilizando 5 pontos experimentais para o compressor modelo A	73
Tabela 4.6 – Resultados utilizando 9 pontos experimentais para o compressor modelo B	73
Tabela 4.7 – Resultados utilizando 5 pontos experimentais para o compressor modelo B	74
Tabela 4.8 – Resultados utilizando 9 pontos experimentais para o compressor modelo C	74
Tabela 4.9 – Resultados utilizando 5 pontos experimentais para o compressor modelo C	74
Tabela 4.10 – Parâmetros de ajuste obtidos nos modelos do EES	76
Tabela 7.1 – Expoentes politrópicos	103

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Esquema de um compressor alternativo	06
Figura 1.2 - Diagrama esquemático indicador para um compressor alternativo	08
Figura 1.3 – Potencial de depreciação da camada de Ozônio dos fluidos refrigerantes	14
Figura 1.4 - Potencial de aquecimento global dos fluidos refrigerantes	15
Figura 1.5 - Impacto de aquecimento total equivalente para alguns refrigerantes ...	16
Figura 1.6 - Esquema de um típico ciclo de refrigeração de um compressor a vapor	17
Figura 1.7 - Comparação entre ciclo ideal e real de refrigeração em um Diagrama T-s	19
Figura 1.8 - Perfil do consumo de energia em 1999	20
Figura 1.9 - Exemplo da curva da taxa do fluxo de massa de um modelo de compressor hermético	23
Figura 1.10 - Esquema de um diagrama de um sistema de calorímetro	26
Figura 2.1 - Foto de um compressor hermético	30
Figura 2.2 - Compressor hermético alternativo de pequena capacidade	31
Figura 2.3 - Diagrama de pressão _ entalpia	35
Figura 2.4 - Caracterização de compressores.....	38
Figura 4.1 - Fluxo de massa e potência elétrica para quatro temperaturas de condensação em função da temperatura de evaporação. (Compressor A, 5 pontos de teste).....	80
Figura 4.2 - Eficiências volumétrica e combinada para quatro temperaturas de condensação em função da temperatura de evaporação. (Compressor A, 5 pontos de teste)	81

Figura 4.3 - Fluxo de massa e potência elétrica para quatro temperaturas de condensação em função da temperatura de evaporação. (Compressor A, 8 pontos de teste)	81
Figura 4.4 - Eficiências volumétrica e combinada para quatro temperaturas de condensação em função da temperatura de evaporação. (Compressor A, 8 pontos de teste)	82
Figura 4.5 - Fluxo de massa para quatro temperaturas de condensação em função da temperatura de evaporação (Compressor A, 8 pontos de teste). Comparação com 25 dados de catálogo da Tecumseh do Brasil LTDA.....	82
Figura 4.6 - Potência elétrica para quatro temperaturas de condensação em função da temperatura de evaporação (Compressor A, 8 pontos de teste). Comparação com 25 dados de catálogo da Tecumseh do Brasil LTDA.....	83
Figura 4.7 - Fluxo de massa e potência elétrica para quatro temperaturas de condensação em função da temperatura de evaporação. (Compressor B, 5 pontos de teste).	83
Figura 4.8 - Eficiências volumétrica e combinada para quatro temperaturas de condensação em função da temperatura de evaporação. (Compressor B, 5 pontos de teste)	84
Figura 4.9 - Fluxo de massa e potência elétrica para quatro temperaturas de condensação em função da temperatura de evaporação. (Compressor B, 9 pontos de teste).	84
Figura 4.10 - Eficiências volumétrica e combinada para quatro temperaturas de condensação em função da temperatura de evaporação. (Compressor B, 9 pontos de teste)	85
Figura 4.11 - Fluxo de massa para quatro temperaturas de condensação em função da temperatura de evaporação. (Compressor B, 9 pontos de teste). Comparação com 25 dados de catálogo da Tecumseh do Brasil LTDA.....	85

Figura 4.12 - Potência elétrica para quatro temperaturas de condensação em função da temperatura de evaporação. (Compressor B, 9 pontos de teste). Comparação com 25 dados de catálogo da Tecumseh do Brasil LTDA	86
Figura 4.13 - <i>Fluxo de massa e potência elétrica para quatro temperaturas de condensação em função da temperatura de evaporação. (Compressor C, 5 pontos de teste)</i>	86
Figura 4.14 - Eficiências volumétrica e combinada para quatro temperaturas de condensação em função da temperatura de evaporação. (Compressor C, 5 pontos de teste)	87
Figura 4.15 - Fluxo de massa e potência elétrica para quatro temperaturas de condensação em função da temperatura de evaporação. (Compressor C, 9 pontos de teste)	87
Figura 4.16 - Eficiências volumétrica e combinada para quatro temperaturas de condensação em função da temperatura de evaporação. (Compressor C, 9 pontos de teste)	88
Figura 4.17 - Fluxo de massa para quatro temperaturas de condensação em função da temperatura de evaporação. (Compressor C, 9 pontos de teste). Comparação com 25 dados de catálogo da Tecumseh do Brasil LTDA.....	88
Figura 4.18 - Potência elétrica para quatro temperaturas de condensação em função da temperatura de evaporação. (Compressor C, 9 pontos de teste). Comparação com 25 dados de catálogo da Tecumseh do Brasil LTDA.	89

SIMBOLOS

\dot{Q}_E - capacidade refrigerante [KW]

P – Pressão [KPa]

P3 – Pressão de sucção [KPa]

P4 – Pressão de descarga [KPa]

Tevap = T_E – Temperatura de evaporação [°C]

Tcond = T_C – Temperatura de condensação [°C]

Pcond – pressão na condensação [KPa]

Pevap – pressão na evaporação [KPa]

$P_{sucção}$ - pressão de sucção [KPa]

$P_{descarga}$ - pressão de descarga [KPa]

V – Volume [m³]

T – Temperatura [K]

h – Entalpia [KJ/Kg]

s – Entropia [KJ/KgK]

η_{comb} – eficiência combinada

η_{ma} - eficiência do fluxo de massa

η_c - eficiência adiabática do compressor

η_m - eficiência mecânica

η_{motor} - eficiência do motor

η_v - eficiência volumétrica

η_{IS} - eficiência isentrópica

C_p – Calor específico à pressão constante [J/KgK]

C_v – Calor específico à volume constante [J/KgK]

R – constante do gás [J/KgK]

$C_1... C_{10}$ – constantes

V_b - volume deslocado total [m³]

V_a - volume da re-expansão do vapor [m³]

V_d - volume nocivo [m³]

v_b - volume específico do refrigerante após a entrada [m³/Kg]

$v_{sucção}$ - volume específico do refrigerante nas condições da linha de sucção [m³/Kg]

n – expoente politrópico

C – volume nocivo [m³]

\dot{m} - taxa de fluxo mássico [Kg/s]

\dot{m}_{calc} - taxa de fluxo mássico calculado [Kg/s]

W – Trabalho [J]

A – área da face do pistão [m²]

δp - queda de pressão [Kpa]

Potência - potência elétrica [W]

k – relação do calor específico C_p/C_v

a, b, d, f – parâmetros da regressão

OF – função objetiva

N – numero de pontos dados

X – taxa de fluxo de massa [Kg/s]

X_{med} – taxa de fluxo mássico [Kg/s] ou potência medida [W]

X_{calc} – taxa de fluxo mássico [Kg/s] ou potência calculada [W]

X_{media} – média de todos os dados medidos da taxa de fluxo mássico [kg/s] ou potência [W]

SIGLAS

EES – *Engineering Equation Solver*

ARI – *Air-Conditioning and Refrigeration Institute*

a.C. – Antes de Cristo

EUA – Estados Unidos da América

CFC – Cloroflúorcarbono

HCFC – Hidrocloroflúorcarbono

RPM – Rotação por minuto

NETeF – Núcleo de Engenharia Térmica e fluidos

COP – Coeficiente de performance

HFC – Hidro flúor carbono

R134a – tetrafluoroetano

R12 – gás freon - diclorodifluorometano

CFC12 – diclorodifluorometano – R12

HCF134a – tetrafluoroetano – R134a

HFC152a – clorodifluoroetano

HC290 – propano

HC600 – butano

HC600a – isobutano

H290 – propano

CO₂ – dióxido de carbono

NH₄ – amônia

R22 – clorodifluormetano

R410a – mistura difluorometano com pentafluoroetano

REFPROP – software de refrigeração

Blends – mistura de gases

DP-1 – novo gás refrigerante da Dupont

ODP – *Ozone Depletion Potential*

GWP – *Global warming potential*

TEWI – *Total Equivalent Warming Impact*

LCCP – *Life Cycle Climatic Performances*

LCA – *Life Cycle Assessment*

ITH – *Integrated Time Horizon*

AFEAS – *Alternative Fluorocarbons Environmental Acceptability Study*

Procel – Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica

Ashrae – *American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers*

LBP – *Low Back Pressure*

HBP – *High Back Pressure*

MBP – *Medium Back Pressure*

CBP – *Commercial Back Pressure*

AC – *Air Conditioning*

EER – *Energy Efficiency Ratio*

OOP – Object oriented program

et. al – e demais autores

MAT Lab – *Matrix Laboratory*

NM – neutro marcha

NP – neutro partida

MP – marcha partida

SUMÁRIO

RESUMO.....	vi
ABSTRACT	vii
LISTA DE TABELAS	viii
LISTA DE FIGURAS	ix
SIMBOLOS.....	xii
SIGLAS	xv
SUMÁRIO.....	xvii
1 Introdução	01
1.1 Histórico	01
1.2 Compressores.....	04
1.3 Ciclo do compressor	07
1.4 Refrigeradores	09
1.5 Fluido Refrigerante.....	10
1.6 Ciclo de Refrigeração.....	16
1.7 Eficiência energética	19
1.8 Pesquisa e Desenvolvimento.....	21
1.9 Mapa do compressor	22
1.10 Calorímetro.....	24
1.11 Objetivos.....	27
2 Revisão Bibliográfica	28
2.1 Tipos de Compressores	28
2.2 Compressores herméticos alternativos	30
2.3 Funcionamento de um sistema frigorífico	31
2.4 Fatores que afetam o desempenho de um compressor	33

2.5	Caracterização de modelos de compressor.....	37
2.6	Método das correlações estatísticas baseadas em variáveis de desempenho do sistema.....	42
2.7	Método das correlações estatísticas baseadas em variáveis do desempenho do compressor	43
2.8	Método dos modelos orientados ao processo	44
2.9	Método dos modelos orientados aos fenômenos	47
2.10	Método dos modelos de construção orientada	51
3	Metodologia	56
3.1	Introdução	56
3.2	Método ARI	57
3.3	Eficiência volumétrica e fluxo de massa	58
3.4	Trabalho	61
3.5	Modelo Matemático	62
4	Resultados	67
4.1	Amostras testadas	67
4.2	Procedimento de teste	68
4.3	Resultados Experimentais	71
4.4	Análise dos resultados.....	72
4.5	Discussão dos dados obtidos	75
5	Conclusão	90
5.1	Conclusão do trabalho	90
5.2	Recomendação de trabalhos futuros	91
6	Referências Bibliográficas	92
7	Apêndice	100

7.1 Processo Politrópico	100
7.2 Tabelas	103
7.3 Dados Experimentais.....	104