



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA

IVAN CARLOS FRANCO

CONTROLE PREDITIVO BASEADO EM MODELO NEURO-*FUZZY* DE SISTEMAS
NÃO-LINEARES APLICADO EM SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO

Orientador: Prof. Dr. Flávio Vasconcelos da Silva

*MODEL PREDICTIVE CONTROL BASED ON NEURO-FUZZY NONLINEAR
SYSTEMS APPLIED TO A REFRIGERATION PLANT*

TESE DE DOUTORADO APRESENTADA À FACULDADE DE
ENGENHARIA QUÍMICA DA UNIVERSIDADE ESTADUAL DE
CAMPINAS, COMO PARTE DOS REQUISITOS PARA OBTENÇÃO DO
TÍTULO DE DOUTOR EM ENGENHARIA QUÍMICA NA ÁREA DE
CONCENTRAÇÃO: SISTEMAS DE PROCESSOS QUÍMICOS E
INFORMÁTICA.

DOCTORATE THESIS PRESENTED TO THE CHEMICAL
ENGINEERING POSTGRADUATION PROGRAMME OF THE SCHOOL
OF CHEMICAL ENGINEERING THE UNIVERSITY OF CAMPINAS TO
OBTAIN THE Ph.D. GRADE IN CHEMICAL ENGINEERING IN FIELD
OF CHEMICAL PROCESSES SYSTEMS AND COMPUTING

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDENTE À VERSÃO FINAL
DA TESE DEFENDIDA PELO ALUNO IVAN CARLOS
FRANCO, E ORIENTADA PELO PROF. DR. FLÁVIO
VASCONCELOS DA SILVA

Prof. Dr. Flávio Vasconcelos da Silva
(orientador)

CAMPINAS, 2012



IVAN CARLOS FRANCO

“CONTROLE PREDITIVO BASEADO EM MODELO
NEURO-*FUZZY* DE SISTEMAS NÃO-LINEARES
APLICADO EM SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO”

*“MODEL PREDICTIVE CONTROL BASED ON
NEURO-FUZZY NONLINEAR SYSTEMS APPLIED TO
A REFRIGERATION PLANT”*

CAMPINAS, 2012



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA

IVAN CARLOS FRANCO

“CONTROLE PREDITIVO BASEADO EM MODELO NEURO-*FUZZY* DE
SISTEMAS NÃO-LINEARES APLICADO EM SISTEMA DE
REFRIGERAÇÃO”

Orientador: Prof. Dr. Flávio Vasconcelos da Silva

*“MODEL PREDICTIVE CONTROL BASED ON NEURO-FUZZY
NONLINEAR SYSTEMS APPLIED TO A REFRIGERATION PLANT”*

Tese de doutorado apresentada à faculdade de engenharia química da
universidade estadual de campinas, como parte dos requisitos para obtenção do título de doutor em
engenharia química na área de concentração: sistemas de processos químicos e informática.

*Doctorate thesis presented to the chemical engineering postgraduation
programme of the school of chemical engineering the university of campinas to obtain the ph.d. Grade in
chemical engineering in field of chemical processes systems and computing*

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDENTE À VERSÃO FINAL
DA TESE DEFENDIDA PELO ALUNO IVAN CARLOS
FRANCO, E ORIENTADA PELO PROF. DR. FLÁVIO
VASCONCELOS DA SILVA

Prof. Dr. Flávio Vasconcelos da Silva
(orientador)

CAMPINAS, 2012

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE
- UNICAMP

F848c	Franco, Ivan Carlos Controle preditivo baseado em modelo neuro-fuzzy de sistemas não-lineares aplicado em sistema de refrigeração / Ivan Carlos Franco. -- Campinas, SP: [s.n.], 2012. Orientador: Flávio Vasconcelos da Silva. Tese de Doutorado - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Química. 1. Identificação de sistemas. 2. Controle preditivo. 3. Refrigeração. 4. Lógica fuzzy. I. Silva, Flávio Vasconcelos da. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Química. III. Título.
-------	---

Título em Inglês: Model predictive control based on neuro-fuzzy nonlinear systems applied to a refrigeration plant

Palavras-chave em Inglês: Identification systems, Predictive control, Refrigeration, Fuzzy systems

Área de concentração: Sistemas de Processos Químicos e Informática

Titulação: Doutor em Engenharia Química

Banca examinadora: Luiz Fernando Novazzi, Fábio Delatore, Ana Maria Frattini Fileti, Claudio Kiyoshi Umezu

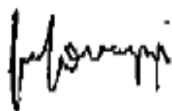
Data da defesa: 03-07-2012

Programa de Pós Graduação: Engenharia Química

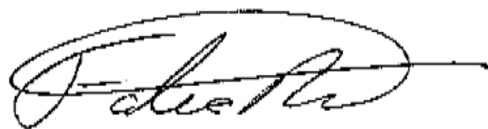
Tese de doutorado defendida por Ivan Carlos Franco e aprovada em 03 de julho de 2012
pela banca examinadora constituída pelos doutores



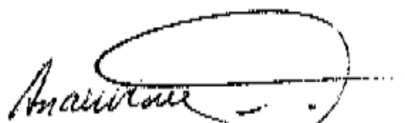
Prof. Dr. Flávio Vasconcelos da Silva
FEQ-UNICAMP



Prof. Dr. Luiz Fernando Novazzi
Centro Universitário da FEI



Prof. Dr. Fábio Delatore
FATEC-Santo André



Prof.^ª Dr.^ª. Ana Maria Frattini Fileti
FEQ-UNICAMP



Prof. Dr. Claudio Kiyoshi Umezu
FEAGRI-UNICAMP

DEDICATÓRIA

À minha querida e amada esposa Gisele
Aos meus pais amados, José e Marlene
Ao meu amigo (orientador) Flávio Vasconcelos da Silva

AGRADECIMENTOS

Agradeço:

A Deus por minha existência.

Minha esposa, Gisele, por todo amor, carinho e incentivo durante esta jornada.

Meus pais José e Marlene por terem realizado esforços hercúleos para que eu conseguisse chegar até aqui.

Minha segunda família, Hermes, Iria e Marcelo por acreditarem em minha vitória.

Ao Prof. Dr. Flávio Vasconcelos da Silva por ter acreditado em meu potencial.

Ao Prof. Lincoln de Camargo Neves Filho por toda atenção à mim concedida.

Aos meus amigos Thiago “Araxá”, Thiago Pinelli e Carlos Parreira (Carlão) por todo conhecimento à mim transferido nestes anos de trabalho.

Meus amigos Jones, Thiago “Araxá” e Lívia e João e Daiana por todos os dias de alegria que juntos tivemos

À Faculdade de Engenharia Química por mais esta oportunidade concedida.

Ao apoio financeiro inicial do CNPq.

“ O primeiro passo para a sabedoria é
reconhecer que somos ignorantes”
Sócrates (470-399 a. C)

RESUMO

Os sistemas de refrigeração estão presentes em diferentes ramos da indústria e caracterizam-se como grandes consumidores de energia com considerável comportamento não-linear. Inúmeros trabalhos vêm sendo desenvolvidos para promover a redução dos gastos energéticos e a minimização dos efeitos das não-linearidades nestes sistemas. A aplicação da automação e do controle de processos, particularmente o uso de técnicas avançadas de controle, são estratégias amplamente utilizadas para esta finalidade. O Controle Preditivo baseado em Modelos (MPC) é capaz de estabilizar processos onde há não-linearidades, sendo promissora a sua aplicação em sistemas de refrigeração. Neste trabalho, foi desenvolvido um SIStema de MOonitoramento e Controlador Avançado para Refrigeração (SISMOCAR) capaz de monitorar, em tempo real, através da comunicação OPC (*OLE for Process Control*), todas as variáveis envolvidas no ciclo de refrigeração e também realizar o controle das variáveis de interesse. Modelos *Takagi-Sugeno* (SISO) para a predição das temperaturas de evaporação (T_e) e do fluido secundário (T_p) foram desenvolvidos e validados, a partir da técnica ANFIS (*Adaptive Network based Fuzzy Inference Systems*), com análise de desempenho baseado no cálculo do VAF (*Variance accounted for*). Os modelos Takagi-Sugeno validados foram utilizados como base para Controladores Preditivos, mais especificamente um Controlador Preditivo Generalizado (GPC). Os controladores GPC's foram desenvolvidos sem restrições na função objetivo da ação do controlador. Foram projetados diferentes controladores preditivos para diferentes regras locais (Regras *Fuzzy*), sendo a ação global do controlador a integração ponderada dos modelos locais. Foram desenvolvidos três diferentes controladores: GPC1 (controle da temperatura de evaporação utilizando modelo de predição da T_e em função da frequência do compressor); GPC2 (controle da temperatura do propilenoglicol utilizando modelo de predição da T_p em função da frequência do compressor) e GPC3 (controle da temperatura do propilenoglicol utilizando o modelo de predição da T_p em função da frequência da bomba do evaporador). Os testes realizados para rastreamento do *set-point* (± 1 °C), com carga térmica constante de 3000 W, mostraram-se satisfatórios sendo os melhores desempenhos apresentados pelos controladores GPC1 e GPC2 onde o desvio da variável controlada em relação ao *set point*, dos respectivos controladores, ficou em torno de $\pm 0,3$ °C.

Palavras-chave: identificação de sistemas; modelo Takagi-Sugeno; controle preditivo; refrigeração

ABSTRACT

Refrigeration systems can be found in many different branches of industry and are characterized as great energy consumers with considerable non-linear behavior. Several studies have been developed to promote the reduction of energy costs and to minimize the effects of nonlinearities in these systems. The use of automation and process control, particularly the use of advanced control techniques, is a widely used strategy for this purpose. The Model Predictive Control (MPC) is capable of stabilizing processes in which there are nonlinearities, and it is a promising application in refrigeration systems. In this work, a System for Monitoring and Advanced Control in Refrigeration (SISMOCAR) was developed using OPC (OLE for Process Control) communication. This feature allowed beyond real time monitoring for all variables involved in the refrigeration cycle, the control of the relevant variables. Furthermore, to predict the evaporating (T_e) and the secondary fluid (T_p) temperatures, Takagi-Sugeno models (SISO) were developed and validated using the ANFIS (Adaptive Network-based Fuzzy Inference Systems) technique, with performance analysis based on the VAF (*Variance accounted for*) calculation. The validated Takagi-Sugeno models were used as basis for Predictive Controllers, specifically using Generalized Predictive Controller (GPC) strategy. The GPC controllers were developed without constraints in the objective function of the controller action. Different predictive controllers were designed for different local rules (*Fuzzy Rules*), being the weighted integration of the local models the controller global action. Three different controllers were developed: GPC1 (evaporating temperature control using the T_e predictive model as a function of compressor frequency); GPC2 (control of propylene glycol temperature using the T_p predictive model as a function of compressor frequency) and GPC3 (control of propylene glycol temperature using the T_p predictive model as a function of the frequency of the evaporator pump). The tests performed for the set-point tracking (± 1 °C), with constant thermal load of 3000 W, were considered satisfactory and best performances were those obtained by GPC1 and GPC2 controllers, in which the controlled variable was around $\pm 0,3$ °C.

Keywords: identification systems, Takagi-Sugeno model, predictive control, refrigeration

Sumário

1. Introdução	1
1.1 Motivação	1
1.2 Objetivos	2
2. Revisão Bibliográfica	5
3. Fundamentação Teórica	13
3.1 Ciclos de refrigeração	13
3.2 Comunicação via protocolo OPC	16
3.3 Técnicas Fuzzy e Neuro-fuzzy	22
3.4 Controle Preditivos baseado em Modelos (MPC)	28
3.4.1 Fundamentos do controle preditivo	29
4. Materiais e Métodos	31
4.1 Protótipo experimental	31
4.1.1 Sistema de refrigeração	31
4.1.2 Instrumentação do sistema de refrigeração	34
4.1.3 Sistema Supervisório	36
4.1.4 A Comunicação via Protocolo OPC	37
4.2 Estudo da dinâmica e identificação do sistema	37
4.2.1 Determinação das condições iniciais dos ensaios	37
4.2.2 Verificação da dinâmica das variáveis do sistema	38
4.2.2.1 Verificação da dinâmica no processo de condensação a ar	38
4.2.2.2 Verificação da dinâmica no processo de condensação a água	39
4.2.3 Identificação do sistema	41
4.2.3.1 Estabelecimento do tempo de amostragem e tempo de assentamento das variáveis	41
4.2.3.2 Determinação do sinal para a identificação	42
4.2.3.3 Modelagem do Sistema	43
5. Resultados e Discussões	51
5.1 Melhorias no protótipo de refrigeração	51
5.2 Instrumentação do sistema de refrigeração	53
5.3 Monitoramento do sistema de refrigeração – Sistema Supervisório	54
5.3.1 Supervisão com <i>InduSoft Web Studio 6.1</i>	54
5.3.2 Interface de comunicação MATLAB®/SIMULINK-Sistema de Refrigeração via protocolo OPC	57
5.3.2.1 Configuração do servidor OPC	57
5.3.2.2 Teste da qualidade da comunicação	59
5.3.3 Sistema de supervisão utilizando o MATLAB/SIMULINK	65
5.4 Dinâmica das variáveis do sistema sob perturbações	67
5.4.1 Processo de condensação a ar (<i>step</i> compressor: 50-60-50 Hz)	67
5.4.2 Processo de condensação a ar (<i>step</i> compressor 50-70-50 Hz)	72

5.4.3 Processo de condensação a ar (<i>step</i> compressor: 50-40-50 Hz)	75
5.4.4 Processo de condensação a água (<i>step</i> compressor: 60-70-60 Hz)	78
5.4.5 Processo de condensação a água (<i>step</i> compressor: 60-50-60 Hz)	80
5.4.6 Processo de condensação a água (<i>step</i> carga térmica: 3000-4000-3000 W)	82
5.4.7 Processo de condensação a água (<i>step</i> carga térmica: 3000-2000-3000 W)	84
5.4.8 Processo de condensação a água (<i>step</i> bomba do evaporador: 50-60-50 Hz)	86
5.4.9 Processo de condensação a água (degrau 50-70-50 Hz)	88
5.4.10 Processo de condensação a água (<i>step</i> bomba do evaporador: 50-40-50 Hz)	89
5.4.11 Análise da não-linearidade do sistema de refrigeração	90
5.5 Modelagem utilizando arquitetura ANFIS	92
5.5.1 Agrupamento subtrativo (<i>Subtractive Clustering</i>)	92
5.5.2 Modelos Takagi-Sugeno I (Sistema de refrigeração utilizando compressor aberto)	94
5.5.2.1 Dados para identificação dos modelos de predição da temperatura de condensação, da temperatura de evaporação e da temperatura do propilenoglicol	95
5.5.2.2 Treinamento ANFIS para determinação dos Modelos Takagi-Sugeno	96
5.5.2.3 Validação dos Modelos Takagi-Sugeno do Grupo I	100
5.5.3 Modelos Takagi-Sugeno II (Sistema de refrigeração utilizando compressor semi-hermético)	104
5.5.3.1 Obtenção do tempo de assentamento das variáveis do modelo TS	104
5.5.3.2 Resultados para identificação dos modelos de predição da temperatura de condensação, da temperatura de evaporação e da temperatura do propilenoglicol	107
5.5.3.4 Treinamento ANFIS para a determinação dos Modelos Takagi-Sugeno para o Grupo I (Variação na frequência do compressor (FQ101))	109
5.5.3.5 Treinamento ANFIS para a determinação dos Modelos Takagi-Sugeno para o Grupo II (Variação na frequência da bomba do evaporador (FQ201))	113
5.5.3.6 Validação dos Modelos Takagi-Sugeno para predição das temperaturas de evaporação e do propilenoglicol em função da frequência do compressor	116
5.5.3.7 Validação dos Modelos Takagi-Sugeno para predição das temperaturas de evaporação e do propilenoglicol em função da frequência da bomba do evaporador	118
5.6 Controle Preditivo utilizando modelo Takagi-Sugeno	121
5.6.1 Estrutura do controlador preditivo	121
5.6.2 Modelos preditivos Takagi-Sugeno	126
5.6.3 Implementação do controlador GPC no Matlab/Simulink®	129
5.6.4 Resultados obtidos na implementação do controle GPC	132
5.6.4.1 Controlador GPC para controle da temperatura de evaporação manipulando a frequência da bomba do evaporador	133
5.6.4.2 Controlador GPC para controle da temperatura do propilenoglicol manipulando a frequência do compressor	134
5.6.4.3 Controlador GPC para controle da temperatura do propilenoglicol manipulando a frequência do compressor	136
6. Conclusões e Trabalhos Futuros	138
6.1 Conclusões	138

6.2 Trabalhos futuros	140
7. Referências Bibliográficas	143
APÊNDICE A: Cálculos on-line realizados no SISMOCAR	151
APÊNDICE B: Dinâmica do Sistema de refrigeração para as condições padrões de ensaio (estado estacionário)	155
APÊNDICE C: Configurações dos itens OPC e informações do SISMOCAR	161
APÊNDICE D: Programação LADDER	173
APÊNDICE E: Representação explícita dos modelos Takagi-Sugeno	181
E.1 Modelos Takagi-Sugeno para o sistema de refrigeração contendo um compressor aberto	181
E.1a Representação explícita baseada nos consequentes das regras fuzzy, do modelo Takagi-Sugeno para a temperatura de condensação, $T_{condi} = q_{i1} + q_{i2} + q_{i3} + q_{i4} + q_{i0}$	181
E.1b Representação explícita baseada nos consequentes das regras fuzzy, do modelo Takagi-Sugeno para a temperatura de evaporação, $T_{evapi} = q_{i1} + q_{i2} + q_{i3} + q_{i4} + q_{i0}$	182
E.1c Representação explícita baseada nos consequentes das regras fuzzy, do modelo Takagi-Sugeno para a temperatura do propilenoglicol, $T_{propi} = q_{i1} + q_{i2} + q_{i3} + q_{i4} + q_{i0}$	183
E.2 Modelos Takagi-Sugeno para o sistema de refrigeração contendo um compressor semi-hermético	184
E.2a Representação explícita baseada nos consequentes das regras fuzzy, do modelo Takagi-Sugeno TS_{FQ101}^{Te} , $Te_i = q_{i1} + q_{i2} + q_{i3} + q_{i4} + q_{i5} + q_{i0}$	184
E.2b Representação explícita baseada nos consequentes das regras fuzzy, do modelo Takagi-Sugeno TS_{FQ101}^{Tp} , $Tp_i = q_{i1} + q_{i2} + q_{i3} + q_{i4} + q_{i5} + q_{i0}$	185
E.2c Representação explícita baseada nos consequentes das regras fuzzy, do modelo Takagi-Sugeno TS_{FQ201}^{Te} , $Te_i = q_{i1} + q_{i2} + q_{i3} + q_{i4} + q_{i5} + q_{i0}$	186
E.2d Representação explícita baseada nos consequentes das regras fuzzy, do modelo Takagi-Sugeno TS_{FQ201}^{Tp} , $Tp_i = q_{i1} + q_{i2} + q_{i3} + q_{i4} + q_{i5} + q_{i0}$	187
ANEXO I: Informações complementares dos equipamentos do sistema de refrigeração	189
A.I.1 – Compressor Bitzer série octagon	191
A.I.2 Trocador de calor tipo placas	198
A.I.3 Trocador de calor casco e tubo	200
A.I.4 Unidade condensadora	202
A.I.5 Bomba centrífuga	207
A.I. 6 Bomba de deslocamento positivo	208
A.I.7 Válvula de expansão	211

Índice de Figuras

<i>Figura 3. 1 Representação de um ciclo de refrigeração teórico no gráfico $P \times h$</i>	13
<i>Figura 3. 2 - Representação de um ciclo de refrigeração ideal e real no gráfico $P \times h$</i>	15
<i>Figura 3. 3 - Hierarquia das camadas do modelo de referência OSI. Baseado em informações do modelo de referência OSI</i>	19
<i>Figura 3. 4 - Acesso a dados de processos com protocolo OPC</i>	21
<i>Figura 3. 5 - Princípios de estimação baseadas em regras e paramétrica, adaptado de (SHAW e SIMOÕES, 1999)</i>	25
<i>Figura 3. 6 - Estrutura de um modelo neuro-fuzzy, adaptado de (CAMPOS e SAITO, 2004)</i>	26
<i>Figura 4. 1 – Diagrama do protótipo de refrigeração disponível no LCAP (Laboratório de Controle de Automação de Processos)</i>	32
<i>Figura 4. 2 – Diagrama de instrumentação do protótipo de refrigeração</i>	35
<i>Figura 4. 3 – Sinal randômico utilizado na identificação do sistema (“Uniform Random Nunber”)</i>	43
<i>Figura 4. 4 – Estrutura ANFIS adotada para a primeira identificação.....</i>	45
<i>Figura 4. 5 – Estrutura ANFIS adotada para o Grupo I da segunda identificação</i>	47
<i>Figura 4. 6 – Estrutura ANFIS adotada para o Grupo II da segunda identificação.....</i>	49
<i>Figura 5. 1 – Módulo de refrigeração: a) original e b) Após primeiro aperfeiçoamento</i>	52
<i>Figura 5. 2 – Módulo de refrigeração após segundo aperfeiçoamento</i>	52
<i>Figura 5. 3 – Tela principal do sistema supervisorio (InduSoft Web Studio 6.1).....</i>	55
<i>Figura 5. 4 – a) Tela do processo de evaporação; b) Tela do processo de condensação a ar e c) Tela do processo de condensação a água.</i>	56
<i>Figura 5. 5 - Hierarquia da criação dos grupos e itens da comunicação via protocolo OPC.....</i>	58
<i>Figura 5. 6 – Mapeamento de itens OPC no sistema real de dados.....</i>	58
<i>Figura 5. 7 – Qualidade da comunicação para o sensor TT_101 (temperatura de descarga)</i>	61
<i>Figura 5. 8 – Qualidade da comunicação para o sensor TT_106 (temperatura de sucção)</i>	61
<i>Figura 5. 9 – Qualidade da comunicação para o sensor PT_103 (pressão relativa de evaporação)</i>	62
<i>Figura 5. 10 – Qualidade da comunicação para o sensor FQ_101 (frequência do motor do compressor).</i>	62
<i>Figura 5. 11 – Pseudo Real-Time: Tempo de envio e recebimento de informações do software e CLP utilizando protocolo de comunicação OPC</i>	63
<i>Figura 5. 12 – Real-Time: Tempo real de execução do software e a comunicação com o CLP via protocolo OPC</i>	64
<i>Figura 5. 13 – Tela principal do SISMOCAR (SIStema de MONitoramento e Controle Avançado para Refrigeração)</i>	66
<i>Figura 5. 14 – Dinâmica da temperatura do R22 na entrada (T_e) e na saída do evaporador com variação na frequência do compressor (50-60-50 Hz), onde $k=10$ s.....</i>	68
<i>Figura 5. 15 - Dinâmica da temperatura do propilenoglicol na entrada (T_p) e na saída do evaporador com variação na frequência do compressor (50-60-50 Hz), onde $k=10$ s.....</i>	68
<i>Figura 5. 16 - Dinâmica da temperatura do subresfriamento, do superaquecimento total e útil com variação na frequência do compressor (50-60-50 Hz), onde $k=10$ s.....</i>	70

Figura 5. 17 - Dinâmica do calor retirado do propilenoglicol e calor adicionado ao R22 com variação na frequência do compressor (50-60-50 Hz), onde $k=10$ s.	71
Figura 5. 18 - Dinâmica da temperatura do R22 na entrada (T_e) e na saída do evaporador com variação na frequência do compressor (50-70-50 Hz), onde $k=10$ s.	73
Figura 5. 19 - Dinâmica da temperatura do propilenoglicol na entrada (T_p) e na saída do evaporador com variação na frequência do compressor (50-70-50 Hz), onde $k=10$ s.	73
Figura 5. 20 - Dinâmica da temperatura do subresfriamento, do superaquecimento total e útil com variação na frequência do compressor (50-70-50 Hz), onde $k=10$ s.	73
Figura 5. 21 - Dinâmica do calor retirado do propilenoglicol e calor adicionado ao R22 com variação na frequência do compressor (50-70-50 Hz), onde $k=10$ s.	74
Figura 5. 22 - Dinâmica da temperatura do R22 na entrada (T_e) e na saída do evaporador com variação na frequência do compressor (50-40-50 Hz), onde $k=10$ s.	76
Figura 5. 23 - Dinâmica da temperatura do propilenoglicol na entrada (T_p) e na saída do evaporador com variação na frequência do compressor (50-40-50 Hz), onde $k=10$ s.	76
Figura 5. 24 - Dinâmica da temperatura do subresfriamento, do superaquecimento total e útil, com variação na frequência do compressor (50-40-50 Hz), onde $k=10$ s.	77
Figura 5. 25 - Dinâmica do calor retirado do propilenoglicol e calor adicionado ao R22 com variação na frequência do compressor (50-70-50 Hz), onde $k=10$ s.	77
Figura 5. 26 - Dinâmica da temperatura do R22 na entrada (T_e) e na saída do evaporador com variação na frequência do compressor (60-70-60 Hz), onde $k=10$ s.	79
Figura 5. 27 - Dinâmica da temperatura do propilenoglicol na entrada (T_p) e na saída do evaporador com variação na frequência do compressor (60-70-60 Hz), onde $k=10$ s.	79
Figura 5. 28 - Dinâmica da temperatura do subresfriamento, do superaquecimento total e útil com variação na frequência do compressor (60-70-60 Hz), onde $k=10$ s.	80
Figura 5. 29 - Dinâmica da temperatura do R22 na entrada (T_e) e na saída do evaporador com variação na frequência do compressor (60-50-60 Hz), onde $k=10$ s.	81
Figura 5. 30 - Dinâmica da temperatura do propilenoglicol na entrada (T_p) e na saída do evaporador com variação na frequência do compressor (60-50-60 Hz), onde $k=10$ s.	81
Figura 5. 31 - Dinâmica da temperatura do subresfriamento, do superaquecimento total e útil com variação na frequência do compressor (60-50-60 Hz), onde $k=10$ s.	82
Figura 5. 32 - Dinâmica da temperatura do R22 na entrada (T_e) e na saída do evaporador com variação na carga térmica (3000-4000-3000 W), onde $k=10$ s.	83
Figura 5. 33 - Dinâmica da temperatura do propilenoglicol na entrada (T_p) e na saída do evaporador com variação na carga térmica (3000-4000-3000 W), onde $k=10$ s.	83
Figura 5. 34 - Dinâmica da temperatura do subresfriamento, do superaquecimento total e útil com variação na carga térmica (3000-4000-3000 W), onde $k=10$ s.	84
Figura 5. 35 - Dinâmica da temperatura do R22 na entrada (T_e) e na saída do evaporador com variação na carga térmica (3000-2000-3000 W), onde $k=10$ s.	85
Figura 5. 36 - Dinâmica da temperatura do propilenoglicol na entrada (T_p) e na saída do evaporador com variação na carga térmica (3000-2000-3000 W), onde $k=10$ s.	85
Figura 5. 37 - Dinâmica da temperatura do subresfriamento, do superaquecimento total e útil com variação na carga térmica (3000-2000-3000 W)	86

Figura 5. 38 – Dinâmica da temperatura do R22 na entrada (T_e) e na saída do evaporador com variação na frequência da bomba do evaporador (50-60-50 Hz), onde $k=10$ s.....	87
Figura 5. 39 – Dinâmica da temperatura do propilenoglicol na entrada e na saída do evaporador com variação na frequência da bomba do evaporador (50-60-50 Hz), onde $k=10$ s.....	87
Figura 5. 40 – Dinâmica da temperatura do R22 na entrada (T_e) e na saída do evaporador com variação na frequência da bomba do evaporador (50-70-50 Hz), onde $k=10$ s.....	88
Figura 5. 41 - Dinâmica da temperatura do propilenoglicol na entrada e na saída (T_p) do evaporador com variação na frequência da bomba do evaporador (50-70-50 Hz), onde $k=10$ s.....	89
Figura 5. 42 – Dinâmica da temperatura do R22 na entrada (T_e) e na saída do evaporador com variação na frequência da bomba do evaporador (50-40-50 Hz), onde $k=10$ s.....	90
Figura 5. 43 – Dinâmica da temperatura do propilenoglicol na entrada e na saída (T_p) do evaporador com variação na frequência da bomba do evaporador (50-40-50 Hz), onde $k=10$ s.....	90
Figura 5. 44 – Dados de treinamento utilizado no desenvolvimento dos Modelos Takagi-Sugeno: a) Frequência do compressor; b) frequência da bomba do evaporador; c) temperatura do propilenoglicol na entrada do evaporador; d) temperatura de condensação; e) temperatura de evaporação e e) temperatura do propilenoglicol.....	96
Figura 5. 45 - Conjunto Fuzzy e funções de pertinência do modelo Takagi-Sugeno a) da Temperatura de condensação, T_{cond} , b) da temperatura de evaporação, T_{evap} , e c) da temperatura do propilenoglicol, T_{prop}	98
Figura 5. 46 - Predição, off-line, da temperatura de condensação, T_{cond}	101
Figura 5. 47 – Distribuição dos dados reais com os dados preditos pelo modelo Fuzzy da temperatura de condensação (validação off-line).....	101
Figura 5. 48 – Predição, off-line, da temperatura de evaporação, T_{evap}	102
Figura 5. 49 – Distribuição dos dados reais com os dados preditos pelo modelo Fuzzy da temperatura de evaporação (validação off-line).....	102
Figura 5. 50 - Predição, off-line, da temperatura do propilenoglicol, T_{prop}	103
Figura 5. 51 – Distribuição dos dados reais com os dados preditos pelo modelo Fuzzy da temperatura do propilenoglicol (validação off-line)	103
Figura 5. 52 – Determinação do tempo de assentamento das variáveis T_p (temperatura do propilenoglicol) e T_e (temperatura de evaporação) para variação na frequência do compressor (60-50-60 Hz).....	105
Figura 5. 53 – Determinação do tempo de assentamento das variáveis T_p (temperatura do propilenoglicol) e T_e (temperatura de evaporação) para variação na frequência do compressor (60-70-60 Hz).....	105
Figura 5. 54 – Determinação do tempo de assentamento das variáveis T_p (temperatura do propilenoglicol) e T_e (temperatura de evaporação) para variação na frequência da bomba do evaporador (50-60-50 Hz)	106
Figura 5. 55 – Determinação do tempo de assentamento das variáveis T_p (temperatura do propilenoglicol) e T_e (temperatura de evaporação) para variação na frequência da bomba do evaporador (50-70-50 Hz)	106
Figura 5. 56 – Determinação do tempo de assentamento das variáveis T_p (temperatura do propilenoglicol) e T_e (temperatura de evaporação) para variação na frequência da bomba do evaporador (50-40-50 Hz)	107
Figura 5. 57 – Dados para o treinamento ANFIS para a determinação dos Modelos Takagi-Sugeno para as temperaturas de evaporação e do propilenoglicol (Grupo I: Variação na frequência do compressor FQ101).....	108

<i>Figura 5. 58 - Dados para o treinamento ANFIS para a determinação dos Modelos Takagi-Sugeno para as temperaturas de evaporação e do propilenoglicol (Grupo II: Variação na frequência da bomba do evaporador FQ201).....</i>	<i>109</i>
<i>Figura 5. 59 – Conjunto Fuzzy e funções de pertinência do modelo Takagi-Sugeno da temperatura de evaporação em função da frequência do compressor.....</i>	<i>110</i>
<i>Figura 5. 60 - Conjunto Fuzzy e funções de pertinência do modelo Takagi-Sugeno da temperatura do propilenoglicol em função da frequência do compressor.....</i>	<i>111</i>
<i>Figura 5. 61 – Conjunto Fuzzy e funções de pertinência do modelo Takagi-Sugeno da temperatura de evaporação em função da frequência da bomba do evaporador.....</i>	<i>113</i>
<i>Figura 5. 62 – Conjunto Fuzzy e funções de pertinência do modelo Takagi-Sugeno da temperatura do propilenoglicol em função da frequência da bomba do evaporador.....</i>	<i>114</i>
<i>Figura 5. 63 – Predição, off-line, da temperatura de evaporação utilizando modelo TS em função da frequência do compressor</i>	<i>116</i>
<i>Figura 5. 64 – Distribuição dos dados reais como os dados preditos pelo modelo TS (temperatura de evaporação em função da frequência do compressor)</i>	<i>117</i>
<i>Figura 5. 65 - Predição, off-line, da temperatura do propilenoglicol utilizando modelo TS em função da frequência do compressor</i>	<i>117</i>
<i>Figura 5. 66 – Distribuição dos dados reais como os dados preditos pelo modelo TS (temperatura do propilenoglicol em função da frequência do compressor).....</i>	<i>118</i>
<i>Figura 5. 67 - Predição, off-line, da temperatura de evaporação utilizando modelo TS em função da frequência da bomba do evaporador</i>	<i>119</i>
<i>Figura 5. 68 – Distribuição dos dados reais como os dados preditos pelo modelo TS (temperatura do propilenoglicol em função da frequência do compressor).....</i>	<i>119</i>
<i>Figura 5. 69 - Predição, off-line, da temperatura do propilenoglicol utilizando modelo TS em função da frequência da bomba do evaporador</i>	<i>120</i>
<i>Figura 5. 70 – Distribuição dos dados reais como os dados preditos pelo modelo TS (temperatura do propilenoglicol em função da frequência da bomba do evaporador).....</i>	<i>120</i>
<i>Figura 5. 71 – Implementação do controlador GPC.....</i>	<i>129</i>
<i>Figura 5. 72 – Cálculo das matrizes: (a) y^{old}; (b) Δu^{old}.....</i>	<i>130</i>
<i>Figura 5. 73 – Cálculo do ganho do controlador km_{pc}.....</i>	<i>130</i>
<i>Figura 5. 74 – Implementação do modelo TS_{Tp}^{F101}: (a) Regra Fuzzy 1; (b) Regra Fuzzy 2; (c) Regra Fuzzy 3; (d) Regra Fuzzy 4; (e) Regra Fuzzy 5; (f) Regra Fuzzy 6</i>	<i>131</i>
<i>Figura 5. 75 – rastreamento do set-point da temperatura de evaporação do controlador GPC1.....</i>	<i>133</i>
<i>Figura 5. 76 – Contribuição das Regras Fuzzy no controlador GPC1 durante o rastreamento do set-point da temperatura de evaporação.....</i>	<i>134</i>
<i>Figura 5. 77 – Rastreamento do set-point da temperatura do propilenoglicol do controlador GPC2.....</i>	<i>135</i>
<i>Figura 5. 78 – Contribuição das Regras Fuzzy no controlador GPC1 durante o rastreamento do set-point da temperatura de evaporação.....</i>	<i>135</i>
<i>Figura 5. 79 – Rastreamento do set-point da temperatura do propilenoglicol do controlador GPC3.....</i>	<i>137</i>
<i>Figura 5. 80 - Contribuição das Regras Fuzzy no controlador GPC1 durante o rastreamento do set-point da temperatura de evaporação.....</i>	<i>137</i>

Figura B. 1 – Dinâmica da temperatura de descarga (T_d) e de condensação (T_c) com $FQ_{101}=60$ Hz, $FQ_{201}=60$ Hz e $Q=300$ W onde $k=1$ s	155
Figura B. 2 - Dinâmica da temperatura do R22 na entrada (T_e) e na saída (T_{rse}) do evaporador com $FQ_{101}=60$ Hz, $FQ_{201}=60$ Hz e $Q=300$ W onde $k=1$ s	156
Figura B. 3 - Dinâmica da temperatura do propilenoglicol na entrada (T_{pee}) e na saída (T_p) do evaporador com $FQ_{101}=60$ Hz, $FQ_{201}=60$ Hz e $Q=300$ W onde $k=1$ s	156
Figura B. 4 - Dinâmica das pressões de descarga (P_d), de condensação (P_c), de evaporação (P_e) e de sucção (P_s) com $FQ_{101}=60$ Hz, $FQ_{201}=60$ Hz e $Q=300$ W onde $k=1$ s	157
Figura B. 5 - Dinâmica das vazões volumétricas (FR_{22}) e mássicas do R22 (m_r) com $FQ_{101}=60$ Hz, $FQ_{201}=60$ Hz e $Q=300$ W onde $k=1$ s	157
Figura B. 6 - Dinâmica das vazões volumétricas (F_p) e mássicas (m_p) do propilenoglicol com $FQ_{101}=60$ Hz, $FQ_{201}=60$ Hz e $Q=300$ W onde $k=1$ s	158
Figura B. 7 - Dinâmica do superaquecimento útil (SAU) e total (SAT) e subresfriamento (SUB) com $FQ_{101}=60$ Hz, $FQ_{201}=60$ Hz e $Q=300$ W onde $k=1$ s	158
Figura B. 8 - Dinâmica do COP de Carnot (COP_C) e real (COP_R) com $FQ_{101}=60$ Hz, $FQ_{201}=60$ Hz e $Q=300$ W onde $k=1$ s	159
Figura C. 1 – Configuração dos itens de escrita OPC do compressor.....	161
Figura C. 2 – Configuração dos itens de escrita OPC do ventilador do condensador a ar.....	161
Figura C. 3 – Configuração dos itens de escrita OPC do ventilador da resistência	162
Figura C. 4 – Configuração dos itens de escrita OPC da bomba do evaporador e condensador	162
Figura C. 5 - Configuração dos itens de escrita OPC da bomba da torre de resfriamento.....	162
Figura C. 6 – Configuração dos itens de escrita OPC do exaustor da bomba de resfriamento	163
Figura C. 7 – Configuração dos itens de leitura OPC das vazões do ciclo de refrigeração	163
Figura C. 8 – Configuração dos itens de leitura OPC das pressões do ciclo de refrigeração.....	163
Figura C. 9 – Configuração dos itens de leitura OPC das temperaturas das malhas de propilenoglicol e do fluido auxiliar de resfriamento.....	164
Figura C. 10 – Configuração dos itens de leitura OPC para geração dos gráficos de monitoramento	164
Figura C. 11 – Configuração dos itens de leitura OPC para geração do banco de dados (arquivo .m)...	165
Figura C. 12 - Configuração dos itens de leitura OPC para o cálculo do subresfriamento, superaquecimento útil e total.....	165
Figura C. 13 – cálculo on-line do subresfriamento e superaquecimento útil e total.....	166
Figura C. 14 – Configuração dos itens de leitura OPC para o cálculo das vazões mássicas de R22 e propilenoglicol	166
Figura C. 15 - Cálculo das vazões mássicas de R22 e propilenoglicol	167
Figura C. 16 - Cálculo do volume específico de R22	167
Figura C. 17 - Cálculo das vazões mássicas de propilenoglicol.....	167
Figura C. 18 - Cálculo das vazões mássicas de R22	168
Figura C. 19 – Configuração dos itens de leitura OPC para o cálculo do calor de evaporação e de condensação trabalho de compressão.....	168
Figura C. 20 – Cálculo as entalpia do gás saturado e do líquido saturado.....	169
Figura C. 21 - cálculo do calor de evaporação e de condensação trabalho de compressão	169

<i>Figura C. 22 – Balanço de energia on-line.....</i>	<i>170</i>
<i>Figura C. 23 – Cálculo do Cp do propilenoglicol.....</i>	<i>170</i>
<i>Figura C. 24 – Cálculo retirado do propilenoglicol.....</i>	<i>171</i>
<i>Figura C. 25 – Calor absorvido pelo R22.....</i>	<i>171</i>
<i>Figura C. 26 – Calculo da potência do compressor.....</i>	<i>171</i>

Índice de Tabelas

<i>Tabela 4. 1 – Equipamentos do ciclo de refrigeração.....</i>	<i>33</i>
<i>Tabela 4. 2 – Equipamento do sistema secundário de troca de calor.....</i>	<i>33</i>
<i>Tabela 4. 3 – Acessórios do protótipo de refrigeração e suas funções.....</i>	<i>34</i>
<i>Tabela 4. 4 – Tipos de sensores utilizados e suas respectivas precisões.....</i>	<i>35</i>
<i>Tabela 4. 5 – Relação de equipamentos de controle.....</i>	<i>36</i>
<i>Tabela 4. 6 – Condições iniciais utilizadas no procedimento de levantamento de dados.....</i>	<i>38</i>
<i>Tabela 4. 7 – Variação na frequência do compressor para condensação a ar.....</i>	<i>39</i>
<i>Tabela 4. 8 – Variação na frequência do compressor para condensação a água.....</i>	<i>40</i>
<i>Tabela 4. 9 – Variação na carga térmica para condensação a água.....</i>	<i>40</i>
<i>Tabela 4. 10 – Variáveis de entrada e de saída da arquitetura ANFIS para os Modelos TS da temperatura de evaporação, de condensação e do propilenoglicol.....</i>	<i>44</i>
<i>Tabela 4. 11 - Variáveis de entrada de saída da arquitetura ANFIS para os Modelos TS da temperatura de evaporação do propilenoglicol do Grupo I.....</i>	<i>46</i>
<i>Tabela 4. 12 - Variáveis de entrada de saída da arquitetura ANFIS para os Modelos TS da temperatura de evaporação do propilenoglicol do Grupo II.....</i>	<i>48</i>
<i>Tabela 5. 1 – Endereçamento das entradas analógicas.....</i>	<i>53</i>
<i>Tabela 5. 2 – Endereçamento das saídas analógicas.....</i>	<i>54</i>
<i>Tabela 5. 3 – Endereçamento das saídas digitais.....</i>	<i>54</i>
<i>Tabela 5. 4 – Representação da qualidade da comunicação para o conjunto de arranjo QQ.....</i>	<i>59</i>
<i>Tabela 5. 5 – Valores dos estados estacionários das variáveis obtidas com a variação na frequência do compressor (50-60-50 Hz).....</i>	<i>71</i>
<i>Tabela 5. 6- Valores dos estados estacionários das variáveis obtidas com a variação na frequência do compressor (50-70-50 Hz).....</i>	<i>74</i>
<i>Tabela 5. 7 - Valores dos estados estacionários das variáveis obtidas com a variação na frequência do compressor (50-40-50 Hz).....</i>	<i>78</i>
<i>Tabela 5. 8 – Ganhos para os processos de condensação a ar e água do sistema de refrigeração.....</i>	<i>91</i>
<i>Tabela 5. 9 – Antecedentes das regras fuzzy para os modelos Takagi-Sugeno de predição das temperaturas: de condensação; de evaporação e do propilenoglicol.....</i>	<i>99</i>
<i>Tabela 5. 10 – Consequentes das regras fuzzy para os modelos Takagi-Sugeno de predição das temperaturas: de condensação; de evaporação e do propilenoglicol.....</i>	<i>100</i>
<i>Tabela 5. 11 – VAF (variance accounted for) para os modelos de predição TS.....</i>	<i>104</i>
<i>Tabela 5. 12 – Antecedentes das regras fuzzy para os modelos Takagi-Sugeno para predição da: Temperatura de evaporação e Temperatura do propilenoglicol.....</i>	<i>112</i>

<i>Tabela 5. 13 – Consequentes obtidos para os modelos Takagi-Sugeno para predição da: Temperatura de condensação; Temperatura de evaporação e Temperatura do propilenoglicol.....</i>	<i>112</i>
<i>Tabela 5. 14 – Antecedentes das regras fuzzy para os modelos Takagi-Sugeno para predição da: Temperatura de evaporação e Temperatura do propilenoglicol em função da frequência da bomba do evaporador.....</i>	<i>115</i>
<i>Tabela 5. 15 – Consequentes obtidos para os modelos Takagi-Sugeno para predição da: Temperatura de condensação; Temperatura de evaporação e Temperatura do propilenoglicol em função da frequência da bomba do evaporador</i>	<i>115</i>
<i>Tabela 5. 16 – VAF (variance accounted for) para os modelos de predição Takagi-Sugeno</i>	<i>121</i>
<i>Tabela 5. 17 – Ensaios para teste da utilização do controlador GPC utilizando como modelo preditivo um modelo Takagi-Sugeno.....</i>	<i>132</i>
 <i>Tabela B. 1 – Estado estacionário do sistema de refrigeração para as condições padrão, FQ101=60 Hz, FQ201=60 Hz e Q=3000 W.....</i>	 <i>159</i>

1. Introdução

1.1 Motivação

A automação industrial vem crescendo aceleradamente em busca de maior produtividade, eficiência e qualidade. O controle e a automação de sistemas vêm evoluindo e fazendo parte cada vez mais do nosso cotidiano; essa evolução traz consigo novos desafios e a necessidade de novas aplicações, dentre essas, o controle e automação de sistemas de refrigeração.

A refrigeração industrial apresenta, como um desses novos desafios, a redução do consumo de energia elétrica pelo fato de serem grandes consumidores. Pode-se encarar esse desafio como oportunidades. Uma dessas oportunidades é o desenvolvimento de sistemas de controle inteligentes e robustos, utilizando teorias *fuzzy* e *neuro-fuzzy*, atuando em dispositivos de expansão eletrônicos e compressores com rotação variável para a melhoria da eficiência energética. O controle e automação é o principal meio de atingir esse objetivo.

De modo geral, a automação e controle estão evoluindo muito (vêm crescendo em um ritmo acelerado), porém, existem áreas em que sua aplicação ainda está carente, e uma dessas áreas é a refrigeração, que tem suma importância em vários setores da indústria química. Os aumentos nos custos de energia e a contínua ênfase em gerenciar o consumo de energia, estão direcionando as pesquisas para o desenvolvimento de novas tecnologias que sejam economicamente viáveis em sistemas de refrigeração.

Diversos fatores vinculados a benefícios econômicos tem aumentando o número de aplicações de controle avançado. Uma análise desses fatores mostra que os processos industriais têm que ser operados de forma apropriada atendendo assim requisitos e normas de qualidades conferidas pela competitividade atual do mercado.

Assim, é de muita importância, *uma linha de pesquisa, onde esses fatores são tratados e analisados experimentalmente*, a fim de levar essa adequação aos processos industriais, fazendo com que os mesmos atendam esses requisitos e normas, com estudos na área de automação e controle avançado de sistemas não-lineares, termodinâmica e ciclos de refrigeração

Este projeto tem como motivação a utilização de técnicas avançadas de controle e automação para o gerenciamento de energia dos sistemas de refrigeração, ou seja, técnicas capazes de apresentar uma redução no consumo de energia por parte destes sistemas.

1.2 Objetivos

O objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de controladores avançados aplicados a um sistema de refrigeração utilizando modelos Takagi-Sugeno como modelos para controle preditivo. Para alcançar esse objetivo deve-se:

- ✓ Realizar aperfeiçoamentos em um sistema de refrigeração experimental do LCAP na FEQ/UNICAMP com a implementação de novos dispositivos que permitam a realização, mais consistente, de controle automático.

Dentre os aperfeiçoamentos está a substituição do compressor aberto por um compressor semi-hermético;

- ✓ Desenvolver interface de comunicação MATLAB®-SR(Sistema de Refrigeração) através do padrão OPC para o monitoramento e controle do sistema de refrigeração;
- ✓ Realizar a identificação do sistema de refrigeração (não-linear) a partir de arquiteturas ANFIS;
- ✓ Desenvolver modelos Takagi-Sugeno para serem utilizados como modelos preditivos em controle preditivo.

2. Revisão Bibliográfica

Sistemas de refrigeração são amplamente utilizados em diversas indústrias, variando do controle de temperatura das instalações para o conforto humano às condições de armazenamento de alimentos perecíveis, passando também pela indústria química e outras aplicações especiais na indústria de manufatura e construção. Os interesses em diminuir o consumo de energia dos sistemas de refrigeração nas indústrias faz com que elas reavaliem o custo-efetividade dos projetos do sistema e estratégia de operação.

Além de sua vasta utilização, a refrigeração é uma etapa de grande importância na indústria. Levando isso em consideração, a seleção adequada de sistemas de refrigeração, o controle das variáveis e o dimensionamento dos componentes destes sistemas são essenciais para uma operação eficiente com uma redução na perda de energia.

Pelo fato de um sistema de refrigeração ser único e original, o projeto do sistema tende a ser mais uma forma de arte do que uma ciência. Mesmo que um sistema de refrigeração específico possa produzir um resultado desejado, muitos sistemas em campo não estão operando em eficiência máxima (MANSKE et al., 2001).

Os sistemas de refrigeração tanto industrial quanto domésticos são baseados no tradicional sistemas “*on-off*” com controle de temperatura pobre e limitado pelas condições operacionais. Os sistemas de refrigeração tradicionais, operando continuamente, diminuem a vida útil do compressor e aumentam o consumo de energia.

Esses sistemas operam a maior parte do tempo com carga parcial. Em respostas a esse tipo de operação o controle de velocidade variável do compressor tem sido estudado. Alguns desses estudos estimaram uma redução de energia de até 41% utilizando um controlador de velocidade variável (LENARDUZZI e YAP, 1998).

O desenvolvimento de um sistema de refrigeração com a utilização de um inversor de frequência para o controle de potência compressor do sistema em malha-fechada foi proposto por Buzelin et al. (2005). O sistema com controle de potência em malha-fechada apresentou uma variação menor de temperatura e uma redução de 35,24% no consumo de energia elétrica comparado com um sistema de refrigeração com controle tradicional “*on-off*”.

A comparação do desempenho de diferentes compressores de deslocamento positivo, entre eles compressor aberto, compressor semi-hermético e compressor aberto com palhetas rotativas, em aplicações na refrigeração, utilizando inversor de frequência, foi realizada por Tassou e Qureshi (1998). Os resultados indicaram que os compressores, utilizando o inversor de frequência para o controle da velocidade, mostraram uma economia de energia na faixa de 12-24% em relação aos que operaram sem o controle de velocidade.

Vargas et al. (1998) realizaram estudos numéricos no ciclo de operação de refrigeradores por absorção visando controle de temperatura. A operação em malha-fechada e em regime transiente do sistema foi simulada e uma significativa redução de consumo de energia foi obtida em comparação ao sistema de controle tradicional “*on-off*”.

A Simulação numérica de um sistema de refrigeração com controle da velocidade foi desenvolvida por Koury et al. (2001). Simulações foram realizadas para verificar as possibilidades de controle do sistema de refrigeração e o superaquecimento na saída do evaporador variando a velocidade do compressor. Os resultados apontam que o modelo proposto pode ser utilizado para formular algoritmos de controle de sistemas de refrigeração.

Em refrigeradores residenciais, de supermercados e ar condicionado, um evaporador corretamente controlado desempenha um papel fundamental na obtenção de alto desempenho (do sistema de refrigeração) especificamente sob circunstâncias dinâmicas. O controle apropriado da válvula de expansão assegura a vazão correta de refrigerante para manter uma temperatura de superaquecimento desejável. Por outro lado, a máxima entalpia específica de vaporização será alcançada (NANAYAKKARA et al., 2002).

Nanayakkara et al. (2002) propuseram o desenvolvimento de uma arquitetura de redes neurais dinâmicas para o controle do evaporador para otimizar a transferência de calor e o grau de superaquecimento de um fluido secundário atuando na abertura da válvula de expansão e no fluxo de fluido secundário. Uma arquitetura moderna de redes neurais, caracterizada por funções de ativação com unidades dinâmicas de sinapses (DSUs), foi adotada para controlar um processo de evaporação de amônia.

Também baseado em redes neurais, um modelo de um sistema de refrigeração por compressão de vapor com velocidade variável do compressor foi apresentado por Navarro-Esbri et al. (2007). O modelo neural de estado estacionário desenvolvido prevê

com precisão o desempenho do sistema com poucos dados experimentais. Os autores relatam, ainda, que este modelo desenvolvido foi o primeiro passo para futuras pesquisas sobre detecção de falhas e otimização de energia em sistemas de refrigeração com variação da velocidade do compressor.

Manske et al. (2001) estudaram a influência de estratégias de operação de um condensador evaporativo no desempenho total de um sistema de refrigeração, apresentando um procedimento passo a passo para determinar o *set-point* principal do controle de pressão que minimizam o consumo de energia elétrica do sistema.

Cada vez mais a lógica *fuzzy* vem se difundindo no desenvolvimento de controle pelo fato da ação de controle *fuzzy* poder ser descrita de forma quantitativa. Uma ação que torna-se difícil de ser convertida em uma equação matemática pode ser facilmente representada por uma expressão qualitativa na lógica *fuzzy*.

Li et al. (2004), propuseram uma estratégia de Controle de Múltiplos Modelos Preditivos (MMPC) baseado em modelos de predição Takagi-Sugeno desenvolvidos utilizando um algoritmo de agrupamento *fuzzy* satisfatório (FSC) aplicado a um processo de neutralização de pH. A estratégia MMPC foi realizada utilizando método de compensação paralela de distribuição (PDC), ou seja, foram projetados diferentes controladores preditivos para diferentes regras locais. Sendo a ação global do controlador a integração ponderada dos modelos locais.

Algumas estratégias de controle de modelo preditivo (um linear e dois não-lineares) foi proposto por Escaño et al. (2009) para controle da esterilização térmica de comidas enlatadas. Os controladores não-lineares foram baseados em modelo neuro-*fuzzy*.

O controlador com melhor desempenho foi o controle preditivo generalizado (GPC), não linear, baseado em uma rede *fuzzy* recorrente. Uma comparação de consumo de energia, com um controlador PI, foi realizada; apresentando os controladores MPC um menor consumo de energia.

Além dos trabalhos anteriormente citados muitos outros foram realizados utilizando modelos Takagi-Sugeno como modelo preditivo em MPC (LEE, 1990; WANG et al., 1996; SOUSA et al., 1997; SKRJANC e MATKO, 2000; SOUSA e KAYMAK, 2001). As aplicações vão do ar condicionado ao trocador de calor; como também testes de estabilidades ou apenas a proposta da utilização dos modelos em controle.

Aprea et al. (2004) apresentaram um algoritmo de controle, baseado em lógica *fuzzy*, capaz de selecionar a velocidade mais apropriada do compressor em função da temperatura do espaço a ser refrigerado. Comparando o controle *fuzzy* para a velocidade do compressor com o controle termostático clássico, obteve-se uma redução de 13% no consumo de energia.

A maioria dos estudos realizados em controle de refrigeração tem como componente principal a válvula de expansão eletrônica. Este tipo de equipamento permite realizar controle no superaquecimento útil e total de um sistema de refrigeração refletindo no coeficiente de performance (COP) do sistema.

Um estudo comparativo entre Controle Preditivo Funcional (PFC) e controle convencional PID aplicado no controle do superaquecimento do evaporador, de um sistema de refrigeração, utilizando uma válvula de expansão eletrônica, foi realizado por Changenet et al. (2008). A comparação realizada indica que o superaquecimento pode ser

melhor controlado utilizando um Controle Preditivo Funcional (PFC) elevando a eficiência energética do sistema frigorífico.

Fallahsohi et al. (2010) realizaram uma comparação entre as técnicas de Controle Preditivo Funcional (PFC) desenvolvido por Changenet et al. (2008) e um PID no controle da pressão de condensação de um sistema de refrigeração utilizando como fluido refrigerante o R410A. Os autores realizaram uma análise da influência da pressão de condensação no coeficiente de performance (COP) constatando que a utilização do PFC leva a um aumento do COP e uma diminuição de 2% na energia gasta no processo em comparação ao PID.

Beghi et al. (2011) propuseram um estudo do desempenho de controladores PID utilizando um algoritmo de auto-ajuste atuando em válvulas de expansão eletrônicas. Os parâmetros do controlador PID são estimados com base em uma identificação do sistema juntamente com o método Zhaug Atherton. O algoritmo proposto pelos autores apresentou um melhor desempenho em comparação a outras abordagens de auto-ajuste.

O controle do superaquecimento em sistemas de refrigeração é muito importante, pois permite uma operação mais eficiente deste sistema. Elliott e Rasmussen (2010) desenvolveram um algoritmo de controle em cascata para eliminar a maior parte da não-linearidade existente na dinâmica da válvula de expansão eletrônica. Os resultados obtidos indicam que a não-linearidade foi reduzida porém o desempenho do controlador ficou comprometido ao trabalhar em uma estreita faixa do atuador.

Ekren et al. (2010) realizaram um estudo comparativo entre diferentes algoritmos de controle, tais como o Proporcional, Integral, Derivativo (PID), o baseado em Lógica

Fuzzy (LF) e o baseado em Redes Neurais Artificiais (RNAs), todos atuando na variação da velocidade do compressor e na válvula de expansão eletrônica. Os controladores baseados em RNA's apresentaram a menor redução no consumo de energia e manteve o superaquecimento mais estável. A redução de energia do controle baseado em RNA foi de 8,1% em comparação ao PID e 6,6 % em relação ao Fuzzy.

Nas últimas décadas, não somente a refrigeração industrial tem crescido como também a refrigeração automotiva tem experimentado avanços significativos. Jabardo et al. (2002) simularam circuitos de refrigeração de sistemas de ar condicionado de automóveis. Seu modelo incluiu um compressor de capacidade variável e uma válvula de expansão termostática adicionada ao evaporador e um micro condensador de fluxo paralelo.

O controle ótimo de uma planta de refrigeração implica na determinação dos *set-points* e formas de operação para que o custo operacional total seja minimizado. O conceito de otimização em sistemas de refrigeração geralmente é reduzido a uma otimização baseada em estado estacionário pré-determinando condições operacionais. Entretanto, na realidade, poucos sistemas operam nas condições pré-determinadas de projetos. A maioria dos sistemas opera sob condições significativamente diferentes do projetado. O desenvolvimento da otimização de sistemas dinâmicos tem sido mais fácil devido aos avanços da tecnologia de controle e automação.

Leducq et al. (2006) apresentaram uma estratégia de otimização dinâmica desenvolvendo um algoritmo ótimo de um controle preditivo não linear em uma planta

piloto de um sistema de refrigeração. Os autores obtiveram uma redução de energia entre 8-20%, dependendo do número de atuadores disponíveis na otimização.

3. Fundamentação Teórica

3.1 Ciclos de refrigeração

Estudos sobre ciclos de refrigeração vêm se tornando cada vez mais elaborados ao passar dos anos. Desde meados do século XX, quando se descobriu a capacidade frigorífica¹ dos gases estudos sobre aplicações e formas de se utilizar desta propriedade dos gases se tornaram alvos de estudos. Os ciclos de refrigeração passaram a ser um importante componente dentro da indústria alimentícia e também na área residencial. Ciclos de compressão a vapor são os mais utilizados industrialmente.

Um ciclo ideal de refrigeração, Figura 3.1, é composto teoricamente da aspiração de vapor saturado de refrigerante proveniente do evaporador (1), da compressão deste vapor (2), da condensação do vapor. Em seguida ocorre a entrada de refrigerante na forma de líquido saturado no controle de líquido (3) e por fim a alimentação no evaporador a uma pressão reduzida (4).

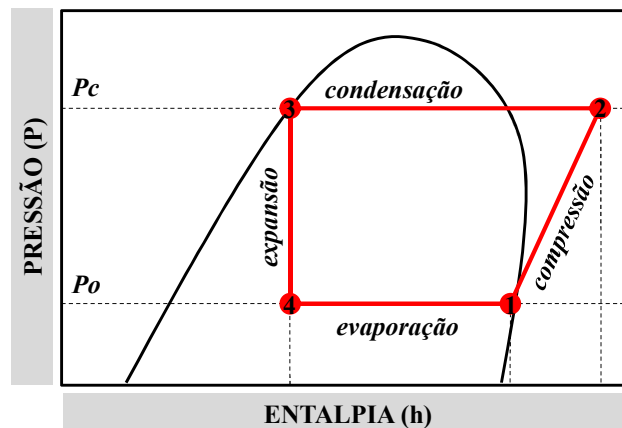


Figura 3. 1 Representação de um ciclo de refrigeração teórico no gráfico $P \times h$

¹ Capacidade do gás de retirar calor do sistema quando submetido a uma expansão

O ciclo ideal de refrigeração (teórico) pode ser descrito como:

A evaporação ocorre entre os pontos (4-1) sob uma pressão P_o (pressão de evaporação). A mistura bifásica troca calor no evaporador (recebe calor do meio) e passa para o estado vapor, onde o efeito frigorífico por kg de refrigerante deslocado é dado por:

$$q_0 = h_1 - h_4 \quad (\text{Eq. 3.1})$$

Onde: q_0 é o efeito frigorífico; h_1 e h_4 são as entalpias específicas do fluido refrigerante nos pontos 1 e 4 do diagrama $P \times h$.

A compressão do vapor aspirado ocorre entre os pontos (1-2). A compressão é isoentrópica e o calor de compressão por kg de refrigerante deslocado é descrito por:

$$q = h_2 - h_1 \quad (\text{Eq. 3.2})$$

Onde: q é o calor de compressão; h_2 e h_1 são as entalpias específicas do fluido refrigerante nos pontos 2 e 1 do diagrama $P \times h$.

Na condensação, ocorre a retirada de calor do vapor superaquecido e posteriormente do vapor saturado estando este na pressão de descarga do compressor (2-3) fazendo com que o vapor passe para o estado líquido. Isto ocorre em uma temperatura de condensação, T_c . O calor retirado, por kg, do refrigerante é dado por:

$$q_c = h_2 - h_3 \quad (\text{Eq.3.3})$$

Onde: q_c é o calor retirado; h_2 e h_3 são as entalpias específicas do fluido refrigerante nos pontos 2 e 3 do diagrama $P \times h$.

A expansão do líquido ocorre entre os pontos (3-4) e é um fenômeno isoentálpico. A pressão do líquido passa de P_c (pressão de condensação) para P_0 (pressão de evaporação). Para um líquido saturado, quanto menor a pressão de evaporação, menor será a temperatura de evaporação, T_0 ; logo, $P_0 = f(T_0)$.

Uma das diferenças, quando se compara um ciclo ideal com um ciclo real de refrigeração, é a existência da queda de pressão nas linhas de descarga, linha de líquido e linha de sucção bem como no evaporador e condensador. Essas perdas de carga ΔP_d e ΔP_s , apresentadas na Figura 3.2.

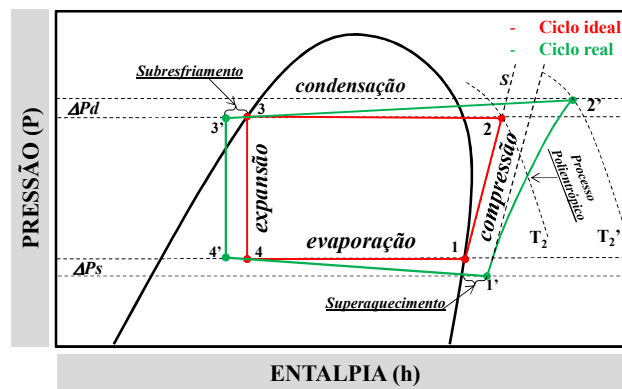


Figura 3. 2 - Representação de um ciclo de refrigeração ideal e real no gráfico $P \times h$

Outras características peculiares de um ciclo de refrigeração real são o subresfriamento do refrigerante na saída do condensador, ponto (3'), e o superaquecimento na sucção, ponto (1'). O superaquecimento tem a finalidade de evitar que o refrigerante entre na fase líquida no compressor. Em um ciclo de refrigeração real nota-se que o processo de compressão é politrópico ($S_1 \neq S_2$), diferentemente do apresentado em um ciclo de refrigeração real (isoentrópico). Essa mudança de entropia, do ciclo ideal para o real, faz com que a temperatura de descarga do compressor (T_2) se eleve para (T_2').

3.2 Comunicação via protocolo OPC

Para realizar o desenvolvimento de sistemas de controle avançados deve-se pensar na melhor maneira de se fazer a comunicação entre os dispositivos e os sistemas de controle e automação proporcionando uma integração, a fim de facilitar a automação e controle. Uma forma é a utilização do padrão OPC² (*OLE³ for Process Control*) que é uma maneira eficiente de estabelecer interfaces para aplicações e é considerado hoje o protocolo padrão da indústria. A vantagem mais acentuada em se utilizar esse tipo de padrão de comunicação é a uniformidade de acesso aos *tags*⁴ com sistemas supervisórios⁵ sem a necessidade de utilizar drives proprietários de controladores. Outras vantagens deste padrão de comunicação são: uniformidade de interface para diferentes redes e protocolos; integração plena com a rede; integração entre diferentes ferramentas de supervisão.

Uma dificuldade encontrada quando se trabalha com sistemas de controle é a implementação dos controladores comerciais, pois, os dispositivos de controle são “caixas-pretas”, utilizando seu próprio algoritmo, que muitas vezes trata-se de um algoritmo “pobre”. Uma forma de resolver esse problema é desenvolver controladores inteligentes, utilizando metodologias avançadas de projeto de algoritmos que permitam o

² Protocolo baseado no modelo de componentização criado pela Microsoft e denominado COM (Component Object Model).

³ OLE (Object Linking and Embedding) é uma tecnologia desenvolvida para suprir a necessidade de integração de diferentes aplicações dentro da plataforma Windows.

⁴Todas as variáveis numéricas ou alfa numéricas envolvidas na aplicação. Podem executar funções computacionais ou representar pontos de entrada/saída de dados do processo que está sendo controlado.

⁵ Sistemas para monitoramento, rastreamento e manipulação de dados de um processo. Também conhecidos com SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition).

aprimoramento de sistemas de controle comparados com técnicas convencionais e fazê-los atuar nos dispositivos de controle através da utilização de um software matemático que vem sendo muito difundido e utilizado nas universidades e indústrias para modelar sistemas dinâmicos, o MATLAB®, mais precisamente o ambiente SIMULINK®. Além de o MATLAB® ser um ambiente robusto para cálculos científicos, apresenta também, uma interface gráfica de fácil compreensão.

Um dos grandes problemas de interface de equipamentos e sistemas reside na compatibilidade dos protocolos da camada de aplicação. Atualmente, existe uma preocupação em padronizar protocolos de comunicação para os CLP's de modo a proporcionar que os equipamentos de fabricantes diferentes “conversem” entre si. Isso se aplica não somente a CLPs, mas também a controladores de processos, a sistemas supervisórios, a redes internas de comunicação (CARDOSO e ZANAROTTI, 2005).

O controle de processo na indústria pode ser representando por três níveis distintos (SOUSA et al., 2003):

1. Nível de campo: onde a presença de dispositivos inteligentes por redes *fieldbus* se torna cada vez mais comum;
2. Nível de processo: onde sistemas DCS e SCADA disponibilizam dados e;
3. Nível gerencial: onde utilizam-se de sistemas de bancos de dados e planilhas. A integração desses níveis é de grande interesse para a indústria. O procedimento usual, para possibilitar essa integração, é o desenvolvimento de *drivers* de comunicação entre diferentes sistemas.

Porém, esse procedimento não é ideal, pois demanda grandes esforços para se desenvolver *drivers* para diversos equipamentos e *softwares*.

O modelo de referência OSI⁶ determina como a parte física (*hardware*) e a parte lógica (*software*) se comunicam. Essa comunicação está baseada nas diferentes camadas existentes entre a parte física e a parte lógica do processo. Cada camada na hierarquia define um subconjunto de funções necessárias para o OSI. Sete camadas foram consideradas suficientes para dividir o sistema em lógicas similares e funções compreensíveis. A hierarquia das camadas do modelo OSI descreve uma hierarquia de funções (MELENDEZ e PETERSEN, 1999). As camadas são apresentadas hierarquicamente da mais baixa (camada física) para a mais alta (camada de aplicação), Figura 3.3.

A camada de aplicação é a camada que a maioria dos programas de rede usa de forma a se comunicar através de uma rede com outros programas. Processos que rodam nessa camada são específicos da aplicação; o dado é passado do programa de rede, no formato usado internamente por essa aplicação, e é codificado dentro do padrão de um protocolo.

⁶ OSI (Open System Interconnection) é o modelo de referência que define normas para a comunicação entre diferentes dispositivos.

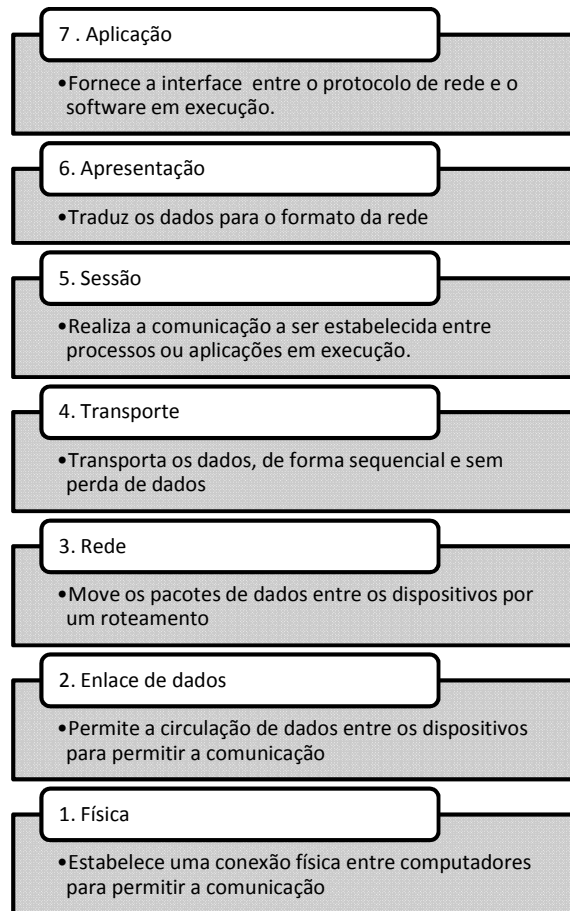


Figura 3. 3 - Hierarquia das camadas do modelo de referência OSI. Baseado em informações do modelo de referência OSI

Para compatibilizar essas camadas de aplicação foi criado o protocolo OPC (OLE for Process Control) estabelecendo assim, regras para que sejam desenvolvidos sistemas com interfaces padrão de comunicação dos dispositivos de campo (CLPs, sensores, balanças, medidores de vazão, etc) com sistemas de monitoramento, supervisão e

gerenciamento (SCADA⁷, MES⁸, ERP⁹, etc) (FONCECA, 2002).

O protocolo OPC representa uma forte tendência de padronização para essa camada de aplicação e é uma realidade. Todo fabricante de CLP fornece um servidor OPC que permite comunicar o equipamento com sistemas de nível hierárquico mais alto, (FONCECA, 2002). Por sua vez todo sistema SCADA, MES, PIMS¹⁰, sistemas especialistas, LIMS¹¹, oferece um cliente OPC capaz de solicitar dados e enviar comandos para um servidor OPC de nível hierárquico mais baixo

O OPC é um padrão de comunicação de dados para supervisão de processos, onde várias informações localizadas em diversos pontos (controladores, dispositivos de E/S, banco de dados, etc) podem ser conectadas diretamente a um “Cliente”, o qual pode executar funções de IHM (Interface Homem-Máquina), supervisão, tratamento gráfico, dentre outras funções. Para realizar essa comunicação, o OPC utiliza-se de um protocolo universal para envio de dados entre “*Servers*” (fontes de dados) e “*Clients*” (aplicações), eliminando dentro do possível o uso de “*drivers*” e conversores, na maioria das vezes proprietários. Esses “*drivers*” proprietários criam uma dependência, muitas vezes custosa e ineficiente, entre o usuário e o fornecedor daquele sistema proprietário.

⁷ SCADA é uma sigla que significa Controle Supervisório e Aquisição de Dados. SCADA refere - se a um sistema que recolhe os dados a partir de diversos sensores de uma fábrica, planta ou em outros locais remotos e, em seguida, envia esses dados para um computador central que, em seguida, gere e controla os dados.

⁸ MES (Manufacturing Execution Systems) é um sistema de chão-de-fábrica orientado para a melhoria de desempenho que complementa e aperfeiçoa os sistemas integrados de gestão (planejamento e controle) da produção.

⁹ ERP (Enterprise Resource Planning) é uma forma de integrar dados e processos em um único sistema.

¹⁰ PIMS (Process Information Management System) realiza o armazenamento temporal das variáveis dos processos produtivos.

¹¹ LIMS (Laboratory Information Management System) é uma ferramenta essencial para a redução de custos e para o aumento da eficiência e da produtividade nas atividades laboratoriais.

Quando se utiliza de um padrão OPC, é necessário somente um “*driver*” padrão que se torna o Servidor (*Server*). Os dados são convertidos para uma forma que qualquer Cliente (*Client*) que tenha uma disposição OPC possa se conectar sem qualquer tipo de preparo prévio, Figura 3.4. Resumindo, o OPC proporciona o verdadeiro *plug-and-play* no campo de supervisão dentro do contexto da moderna automação industrial, (FONCECA, 2002).

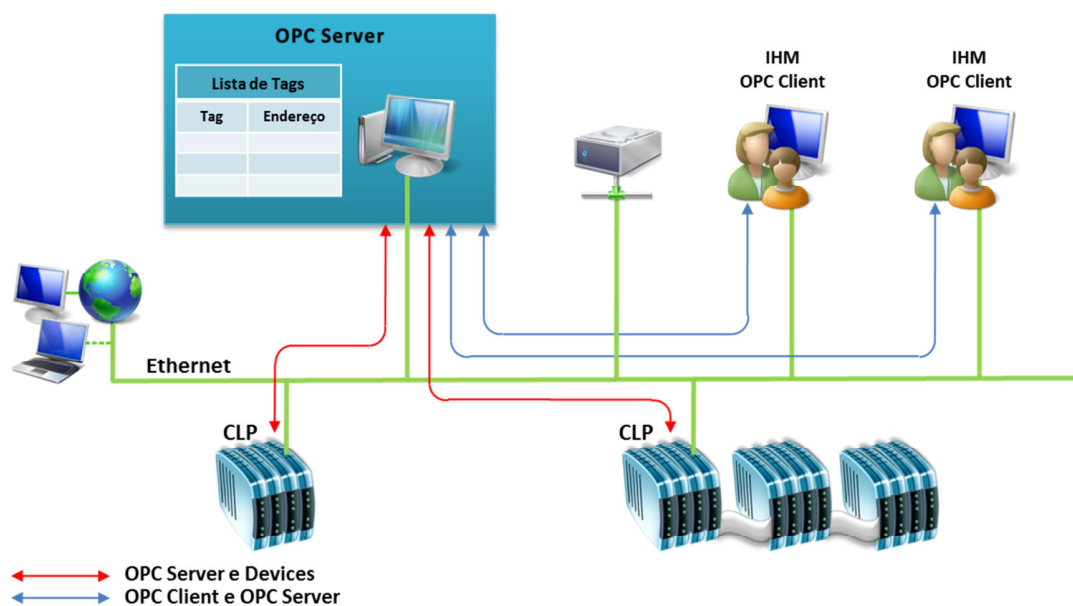


Figura 3. 4 - Acesso a dados de processos com protocolo OPC

A *OPC Foundation* é uma organização que aprimora e amplia as especificações OPC que tem a finalidade orientar os desenvolvedores para a implementação das aplicações cliente e servidor (FONSECA, 2002). Essas especificações permitiram o desenvolvimento de vários produtos para a automação industrial. O uso de OPCs Servers permite que existam algumas vantagens em relação ao desenvolvimento de projetos onde se utilizam *drivers* (MACIEL, 2003). Algumas delas são:

- ✓ Uniformidade de interface para diferentes redes e protocolos, ou seja, dispensa a necessidade de ajustes dos *drivers* de cada rede, o que costuma levar tempo na configuração;
- ✓ Integração plena com a rede, mesmo quando alterações de protocolo forem implementadas, o OPC será utilizado pelo fabricante;
- ✓ Elimina a necessidade de *drivers* proprietários de comunicação;
- ✓ Integração entre diferentes ferramentas de supervisão.

3.3 Técnicas Fuzzy e Neuro-fuzzy

“Os modelos matemáticos de um processo real e complexo serão sempre uma simples representação da realidade”. Esta afirmação de Harris et al. (1993), demonstra que todos os conhecimentos disponíveis de um sistema (seja qual for o sistema) não serão providos de informações completas e apresentarão sempre incertezas.

Os modelos baseados em lógica *fuzzy* também são representações simplificadas da realidade. Porém, através da lógica *fuzzy* pode-se *tentar* controlar o processo *imitando* o operador humano através de descrições e experimentos (base de conhecimento heurístico) do processo produzindo assim as ações de controle desejadas.

A primeira etapa de elaboração de um modelo é a definição das variáveis de entrada e saída. Após a definição das variáveis de entrada e saída é definido o seu

universo de discurso¹² e o número de valores linguísticos¹³ necessários (através de uma função de pertinência) de cada variável.

Na base de conhecimento serão atribuídas as informações a respeito do universo de discurso, dos valores linguísticos e das funções de pertinência das variáveis do sistema; associando as variáveis linguísticas de entrada com as de saída. A aquisição de conhecimento poderá ser realizada através de: obtenção manual, modelagem do comportamento do operador; modelagem do processo e extração automática do conhecimento.

Na etapa de raciocínio *fuzzy* são utilizadas as regras juntamente com as variáveis de entrada medidas no processo satisfazendo parcialmente as condições das regras ou os antecedentes das regras. A existência de vários antecedentes em uma regra exige a utilização de um operador mínimo para calcular a ativação do consequente dessa regra.

A próxima etapa é transformar as inferências das regras em valores numéricos que possam ser utilizados em uma ação de controle real, na linguagem *fuzzy* realizar a *defuzzificação*. Ou seja, transforma uma saída no domínio *fuzzy* para o domínio real. Não existe um meio sistemático para realizar a *defuzzificação*. Os métodos mais utilizados são:

1. Centro-da-Área ou Centro-de-Gravidade (C-o-A);

¹² Matematicamente, o universo de discurso é um conjunto de valores finitos o qual contém todos os valores possíveis das variáveis do sistema.

¹³ É o número *fuzzy* definido no universo de discurso. Exemplo de uma variável Temperatura: $T_{(temperatura)} = \{\text{baixa, média, alta}\}$.

2. Centro-do-Máximo (C-o-M),
3. Média-do-Máximo (M-o-M).

O método Centro-da-Área (C-o-A), por exemplo, calcula o centro de gravidade desta área pela seguinte equação:

$$u^* = \frac{\sum_{i=1}^N u_i \mu_{OUT}(\mu_i)}{\sum_{i=1}^N \mu_{OUT}(\mu_i)} \quad (\text{Eq. 3.4})$$

Onde $\mu_{OUT}(u_i)$ é a área de uma função de pertinência.

As redes neurais artificiais (RNA's) são sistemas inspirados no funcionamento do cérebro humano. Nestes sistemas estão presentes unidades de processamentos simples (neurônios) que tem a finalidade de computar funções matemáticas. Essas unidades são distribuídas em uma ou mais camadas e integradas por um grande número de conexões. Na maioria das arquiteturas estas conexões estão associadas a pesos sinápticos. Esses pesos armazenam o conhecimento adquirido pela rede e ponderam a entrada recebida por cada neurônio da rede (HAYKIN, 2001).

Dentre os tipos de RNA's estão: Perceptron, Rede de Kohoen, Rede com aprendizagem de Hebb, Rede ADALINE (ADaptive LINEar Element), Rede multicamadas e algoritmo de retropropagação, Rede neural de base radial.

Rede neuro-*fuzzy* é a combinação de redes neurais com lógica fuzzy. Ou seja, modelos neuro-*fuzzy* combinam a capacidade de aprendizagem das redes neurais com a capacidade de raciocínio dos sistemas *fuzzy*. Dessa forma, elas formam uma estrutura que

atualiza seus parâmetros em função de uma relação entrada-saída desejada (SATO e CAMPOS, 2004).

Na lógica *neuro-fuzzy* estão presentes duas fontes de informações importantes: Sensores e conhecimento humano. Os sensores nos fornecem a medição numérica de uma variável e o conhecimento humano fornece as instruções linguísticas e descrições do sistema.

A estrutura de uma rede *neuro-fuzzy*, Figura 3.5, pode ser desenvolvida por uma topologia baseada em regras, SE-ENTÃO, relacionando entradas *fuzzy* com saídas *fuzzy*; ou em uma topologia na forma paramétrica, onde a parte SE das regras (premissas) são operações lógicas e a parte ENTÃO (consequências) são funções lineares das variáveis de entrada (SHAW e SIMÕES, 1999).

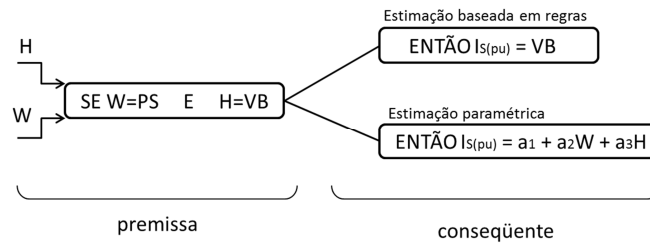


Figura 3. 5 - Princípios de estimação baseadas em regras e paramétrica, adaptado de (SHAW e SIMOÕES, 1999)

Para o desenvolvimento de modelos *neuro-fuzzy* pode-se utilizar uma estrutura baseada na forma de Takagi-Sugeno. A base de conhecimento do modelo é um conjunto de regras na forma de Takagi-Sugeno¹⁴. Desse modo, nestes sistemas de Takagi-Sugeno, cada regra define uma região do espaço de entrada, onde a saída é uma combinação

¹⁴ O modelo Takagi-Sugeno é, resumidamente, a geração de M regras *fuzzy* a partir de n dados de entrada-saída.

linear das variáveis de entrada (CAMPOS e SAITO, 2004). A *defuzzyficação* pode ser obtida pelo método da média ponderada:

$$y_k = \frac{\sum_{i=1}^N \mu_i f_i^k}{\sum_{i=1}^N \mu_i} \quad (\text{Eq. 3.5})$$

A estrutura do modelo neuro-fuzzy, Figura 3.6, é dividida em três partes: premissa (camadas 1 e 2), consequente (camada 3) e decodificação (camadas 4, 5, 6 e 7), onde o consequente é formado por polinômios lineares das variáveis de entrada (premissa) (CAMPOS e SAITO, 2004).

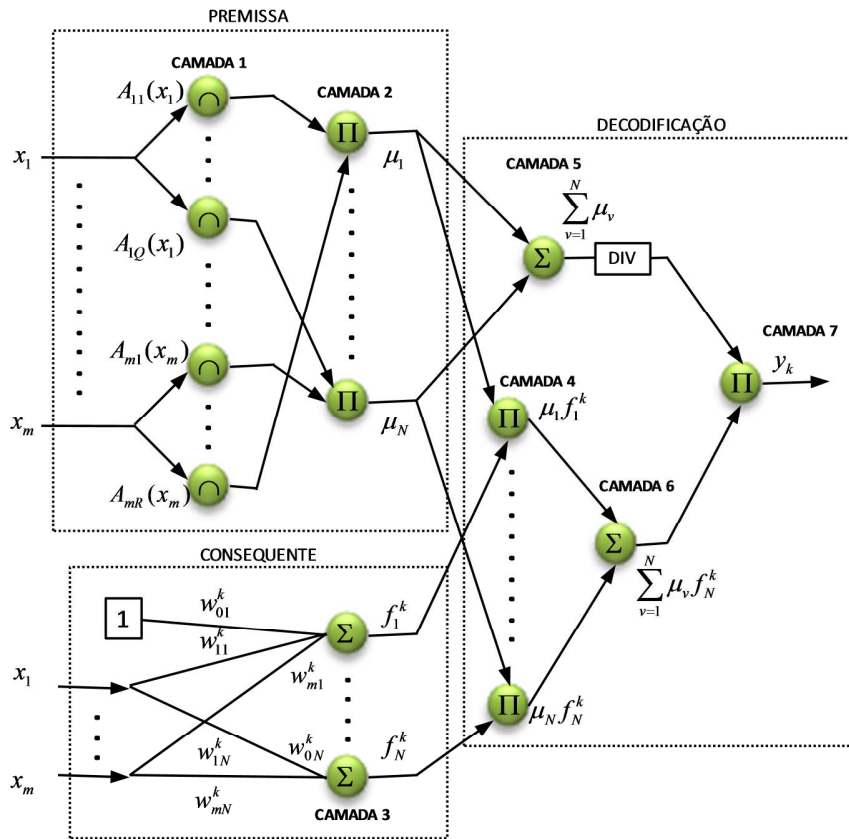


Figura 3. 6 - Estrutura de um modelo neuro-fuzzy, adaptado de (CAMPOS e SAITO, 2004)

Na camada 1, cada nó representará uma variável linguística do espaço de entrada com função de pertinência gaussiana, onde a saída é uma possível antecedente de uma regra *fuzzy*. Os nós $A_{11}(x_1) \dots A_{1Q}(x_1), \dots, A_{m1}(x_m) \dots A_{mR}(x_m)$ são termos linguísticos (ALTO, BAIXO, ...) da variável de entrada $x_1, \dots, x_m$.

Na camada 2, cada nó representará uma regra *fuzzy*, tendo como saída a ativação da regra para uma determinada entrada $(SE\{x_1 = A_{11}(x_1)\} \text{ E } \{x_m = A_{mR}(x_m)\} \text{ ENTÃO } \mu_{11} = A_{11}(x_1) \cdot A_{mR}(x_m))$.

Na camada 3, cada nó representará um polinômio linear das variáveis de entrada cujos coeficientes são os pesos dos seus termos. A saída é o consequente desejado de uma regra *fuzzy* associada, $(SE\{x_1 = A_{11}(x_1)\} \text{ E } \{x_m = A_{mR}(x_m)\} \text{ ENTÃO } \{saída\} x_k = f_1^k)$.

Na camada 4, a saída de cada nó será o produto da saída da camada 2 (ativação da regra) pela respectiva saída da camada 3 (consequente da regra).

Na camada 5, a saída de cada nó será o somatório das saídas da camada 2 (as ativações das regras).

Na camada 6, a saída de cada nó será o somatório das saídas da camada 4 (ponderação das saídas das regras pelas respectivas ativações).

Na camada 7, cada nó representará uma saída do sistema, que é a razão entre as camadas 6 e 5:

$$y_k = \frac{\sum_{i=1}^N \mu_i f_i^k}{\sum_{i=1}^N \mu_i} \quad (\text{Eq. 3.6})$$

3.4 Controle Preditivos baseado em Modelos (MPC)

Uma técnica de controle utilizando-se de modelos preditivos pode e deve ser considerada uma técnica *avançada* de controle porém, antes mesmo de se referir à “implementação de controladores *avançados*”, deve-se esclarecer qual a verdadeira descrição deste assunto que vem despontando promissoramente na área de aplicação industrial e acadêmica. Nos anos 40, os controladores avançados, considerados na época, eram controladores convencionais ou clássicos: controle em cascata, *feedforward* e compensadores avanço-atraso. Já na década de 60 essa percepção de “*avançado*” passou a ser qualquer controlador que utilizasse um algoritmo ou estratégia de controle que se diferenciasse do controle PID clássico. Então, essa diferença entre convencional e avançado está no macro de referência adotado.

Agora, de um ponto de vista mais técnico, o projeto de algoritmos de controladores avançados envolve a combinação de uma multidisciplinaridade (engenharia de controle, processamento de sinais, estatística, teoria de decisão, inteligência computacional, etc.), (VARGAS-LARA,2005).

Uma característica importante em um modelo, de controle avançado é que este modelo deve descrever com precisão a dinâmica das variáveis do sistema que sejam essenciais na projeto do controlador, sendo capaz de predizer o comportamento futuro do processo com bom desempenho nas predições.

Varga-Lara (2005), relata que, um modelo explícito e medições inerentes ao sistema podem ser utilizados em controle preditivo baseado em modelo (*MPC - Model*

Predictive Controller) para prever o comportamento deste sistema *passos-a-frente*; com a ação de controle calculada a fim de minimizar a diferença entre a resposta predita do sistema e determinadas trajetórias de interesse.

Em geral, os controladores MPC são desenvolvidos com base em modelos empíricos; fazendo com que a etapa de identificação do sistema seja fundamental na implementação destes controladores e também a maior absorvedora de tempo e recursos no projeto de um controlador (RIVERA et al., 1992; SEBORG, 1999; MORARI e LEE, 1999; ZHU, 1998).

Segundo Vargas-Lara (2005) a maioria dos modelos utilizados dentro da estrutura de controle preditivo, para prever k -passos-à frente da variável de saída, são identificados com algoritmos na forma de mínimos quadrados. E, tendo em vista que estes tipo de erros tendem a se acumular de uma interação a outro, não são obtidas assim boas previsões. Uma alternativa é a utilização de modelos via identificação.

Assim, neste trabalho, a fim de reduzir o erro nos preditores, modelos identificados pela técnica ANFIS foram utilizados para orientar controladores preditivos

3.4.1 Fundamentos do controle preditivo

De acordo com Vargas-Lara (2005), os passos principais que descrevem os fundamentos do controle preditivo são:

- Obtenção de dados referentes às entradas e saídas em instantes passados do sistema: $u(t-1)$, $u(t-2)$, $\dots$, $u(t-j)$ e $y(t-1)$, $y(t-2)$, $\dots$, $y(t-j)$.

- Determinação da trajetória de referência a partir da trajetória estipulada para saída do sistema, $r(t+k)$, $k = N_{min}, \dots, N_{max}$. Onde N_{min} e N_{max} são, respectivamente, o horizonte de predição mínimo e máximo.
- Utilização de um modelo apropriado para a predição da saída do sistema (calculado sobre o horizonte de predição N_p : $[N_{min}, N_{max}]$). A saída predita deve estimar os valores de $y(t)$ nos instantes $(t+k)$, a partir dos valores de entrada e saída medidos até o instante t , e dos sinais futuros do controle.
- Cálculo da sequência de controle, a partir do modelo do sistema, a fim de satisfazer alguma função objetivo: – que minimize o desvio da saída predita em relação à trajetória de referência, ao longo do horizonte de predição; e – que minimize o esforço de controle para que a saída predita do processo atinja a referência (set-point). Uma solução analítica pode ser encontrada se um critério quadrático é usado, para um modelo linear e sem restrições.
- Adiciona-se no sistema o primeiro elemento da sequência de controle calculada, $u(t/t)$ rejeitando-se os elementos seguinte $u(t+1/t)$, $u(t+2/t)$, ..., $u(t+i-1/t)$. Sendo $i = 1, \dots, N_c$, com N_c o horizonte de controle, levando-se em consideração que após este horizonte os esforços de controle são nulos: $u(t+i-1/t) = 0$ para $i > N_c$. A sequência de controle é recalculada no próximo intervalo de amostragem.

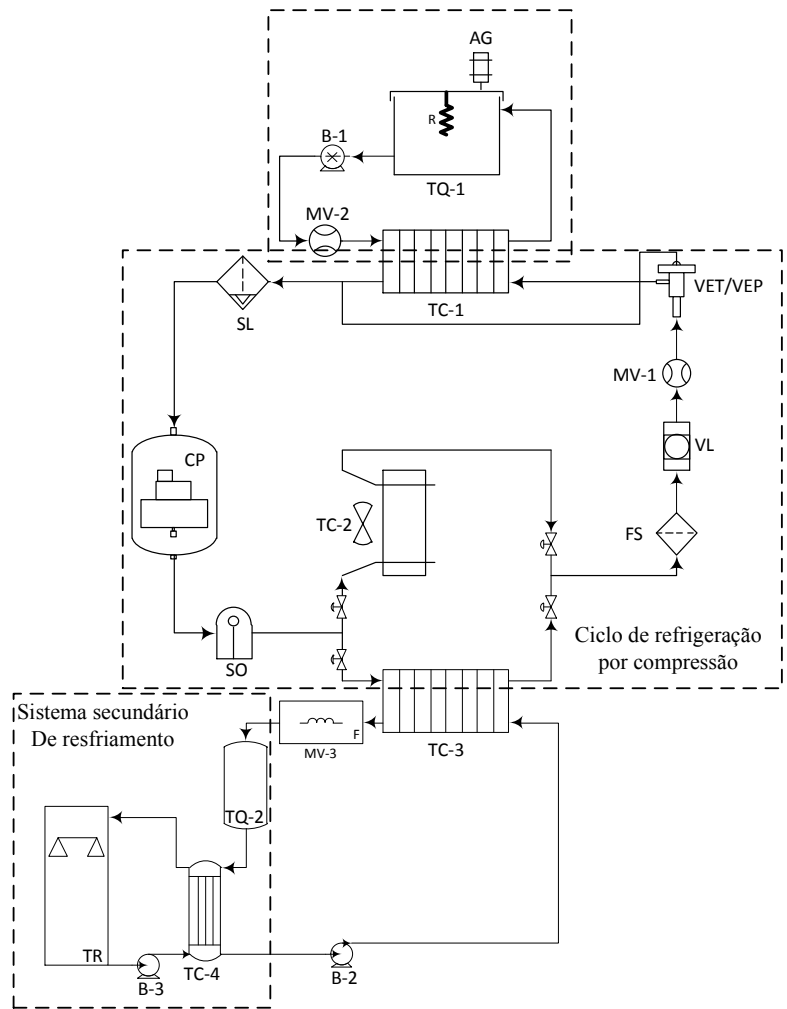
4. Materiais e Métodos

4.1 Protótipo experimental

4.1.1 Sistema de refrigeração

O protótipo de refrigeração utilizado neste trabalho, montado no LCAP-FEQ, que foi desenvolvido em conjunto com Pinelli (2008) é composto por um sistema principal, ciclo de refrigeração, e um sistema secundário para a troca de calor quando utiliza-se o processo de condensação a água. O sistema passou por duas modificações, descritas no tópico 5.1, com o objetivo de melhorar seu desempenho e segurança. O diagrama representativo do protótipo pode ser verificado na Figura 4.1.

O protótipo consiste em um ciclo de refrigeração por compressão empregando o R22 como fluido refrigerante e seu objetivo é o resfriamento de líquido, que neste caso é uma solução de propilenoglicol-água (50% V/V). O sistema é composto por um processo de compressão, utilizando um compressor semi-hermético, um processo de evaporação, onde um trocador de calor tipo placas é utilizado como evaporador, um processo de expansão contendo uma válvula de expansão termostática e uma pressostática (neste trabalho o primeiro tipo de válvula foi utilizado) e um processo de condensação a ar, utilizando um trocador de calor tipo tubo ou condensação a água, utilizando um trocador de calor tipo placas. A simulação da carga térmica se dará por meio de uma resistência elétrica. Sendo esta carga térmica constante durante todo ensaio.



AG:	Aagitador
B-1:	Bomba do Evaporador
B-2:	Bomba do Condensador a água
B-3:	Bomba da torre de resfriamento
CP:	Compressor
FS:	Filtro secador
MV-1:	Medidor de vazão R22
MV-2:	Medidor de vazão propilenoglicol
MV-3:	Medidor de vazão fluido de auxiliar de resfriamento
R:	Resistência (carga térmica)
SL:	Separador de líquido
SO:	Separador de óleo
TC-1:	Evaporador
TC-2:	Condensador (ar)
TC-3:	Condensador (água)
TC-4:	Trocador casco tubo (torre de resfriamento)
TQ-1:	Tanque de propilenoglicol refrigerado
TQ-2:	Tanque de fluido auxiliar de resfriamento
TR:	Torre de resfriamento
VEP:	Válvula de expansão pressostática
VET:	Válvula de Expansão termostática
VL:	Visor de líquido

Figura 4. 1 – Diagrama do protótipo de refrigeração disponível no LCAP (Laboratório de Controle de Automação de Processos)

Os equipamentos existentes no ciclo de refrigeração podem ser verificados na Tabela 4.1 e no ANEXO I.

Tabela 4. 1 – Equipamentos do ciclo de refrigeração

Equipamento	Tipo	Modelo	Fabricante
Compressor	Semi-Hermético	2FC-2.2 (Série Octagon)	Bitzer
Trocador de Calor ¹	Placas Brasado	CB 26M	Alpha Laval
Trocador de Calor ²	Placas Brasado	CB 26M	Alpha Laval
Trocador de Calor ³	Tubos	Parte de uma UC 165/2	Bitzer
Ventilador ³	Axial	NW/4-350	Separis
Válvula de expansão	Termostática	TEX 2	Danfoss
Válvula de expansão	Pressostática	-	Danfoss
Bomba ²	Centrífuga	Hydrobloc P500	KSB
Bomba ¹	Deslocamento positivo	RZR500	RZR
Resistência elétrica	Imersão	Termo S	-
1 Processo de evaporação; 2 processo de condensação a água; 3 processo de condensação a ar			

O processo de condensação a água conta com um sistema secundário de troca de calor. O sistema secundário se faz necessário devido ao fato de que trocadores de calor a placa brasados apresentam uma forte tendência para o surgimento de incrustações caso não haja a utilização de água tratada no processo. Este sistema secundário é composto por uma torre de resfriamento e um trocador de calor do tipo casco e tubo. O trocador de calor tipo casco e tubo é responsável pela troca de calor em um circuito fechado, onde uma solução de propilenoglicol (que não é incrustante) troca calor com o fluido refrigerante R22 (processo de condensação) e o calor absorvido pelo propilenoglicol é rejeitado no trocador de calor casco e tubo por onde circula água proveniente da torre de resfriamento. Os equipamento envolvidos no sistema secundário de troca de calor podem ser verificados na Tabela 4.2.

Tabela 4. 2 – Equipamento do sistema secundário de troca de calor

Equipamento	Tipo	Modelo	Fabricante
Bomba	Centrífuga	Hydrobloc P500	KSB
Trocador de calor	Casco e tubo	TSEV-1000-3.4F	Evacon
Exaustor	Condor	-	VentiSilva

Além dos equipamentos apresentados nas Tabelas 4.1 e 4.2 o protótipo de refrigeração de líquido possui alguns acessórios que garantem a segurança do sistema e melhoram seu desempenho. Na Tabela 4.3 pode-se observar os acessórios utilizados no protótipo.

Tabela 4. 3 – Acessórios do protótipo de refrigeração e suas funções

Acessório	Função
Filtro secador	Reter umidade e partículas sólidas presentes no fluido refrigerante
Separador de óleo	Impedir a mistura de óleo com o fluido refrigerante (causando perda de eficiência) e retornar óleo ao compressor (mantendo a lubrificação)
Separador de líquido	Impedir a entrada do fluido refrigerante na fase líquida no compressor
Visor de líquido	Permitir a visualização da quantidade de fluido refrigerante no sistema
Pressostato diferencial	Proteger o compressor contra pressões de óleo insuficientes
Pressostato Conjugado (alta/baixa)	Proteger o compressor contra pressões fora dos limites estabelecidos

4.1.2 Instrumentação do sistema de refrigeração

A instrumentação do sistema de refrigeração, Figura 4.2, permite que uma quantidade maior de informações das variáveis de processo e de controle do sistema seja aquisitadas. A instrumentação, aliada à aplicação tecnológica digital de transmissão de dados, faz com que essas informações sejam confiáveis e precisas, possibilitando maior monitoramento das condições de operação.

O desenvolvimento de um sistema de refrigeração onde o consumo de energia seja minimizado necessita de tecnologias inovadoras. Assim sendo, foram instalados no protótipo de refrigeração sensores de temperatura, de pressão e de vazão permitindo uma melhor avaliação e monitoramento do comportamento do sistema. Para a variação da

carga térmica foi utilizada uma resistência elétrica modulada por um variador de potência. Os sensores utilizados são resumidos na Tabela 4.4.

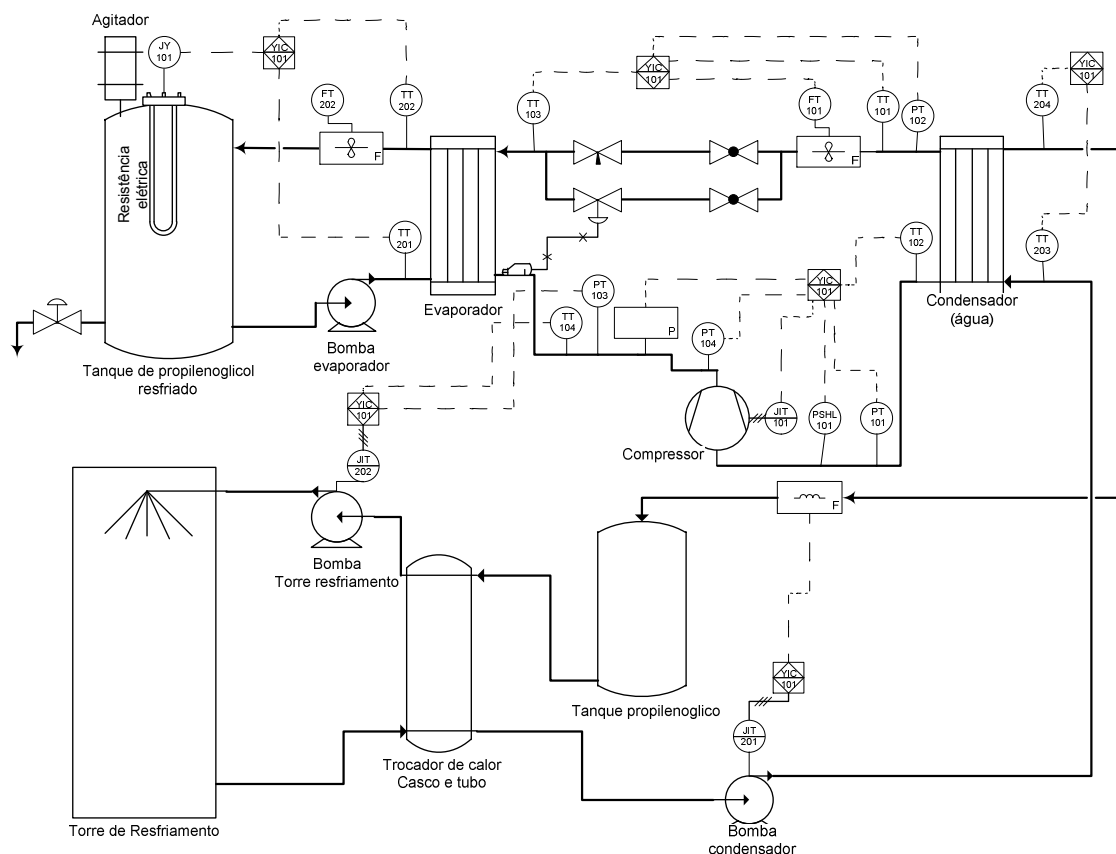


Figura 4. 2 – Diagrama de instrumentação do protótipo de refrigeração

Tabela 4. 4 – Tipos de sensores utilizados e suas respectivas precisões

Sensor	Tipo	Range	Precisão ^a	Sinal de saída
Transmissor de temperatura	Termo resistência Pt100	-50 a 150 °C	± 0,5 °C	4-20 mA
Transmissor de pressão	Piezo-resistivo	0 a 10 bar	± 0,05 bar	4-20 mA
Transmissor de pressão	Piezo-resistivo	0 a 40 bar	± 0,2 bar	4-20 mA
Transmissor de vazão volumétrica	Turbina	0,17 a 1,70 m ³ ·h ⁻¹	± 0,02 m ³ ·h ⁻¹	4-20 mA
Transmissor de vazão volumétrica	Turbina	1,14 a 11,50 L·min ⁻¹	± 0,2 L·min ⁻¹	4-20 mA
Transmissor de vazão volumétrica	Magnético	0,12 a 4,07 m ³ ·h ⁻¹	± 0,02 m ³ ·h ⁻¹	4-20 mA
Conversor de potência	Pulso	0 a 6.000 W	-	4-20 mA

a valores obtidos dos respectivos data sheets e certificados de calibração

Um inversor de frequência também foi utilizado para modular a velocidade de rotação do compressor (neste caso um compressor semi-hermético) e das bombas do evaporador e do condensador, através da variação da frequência da tensão elétrica. Todo o gerenciamento do sistema foi realizado via CLP (Controlador Lógico Programável)/Microcomputador sendo as sequências de comandos implementados na plataforma de programação LADDER¹⁵. Na Tabela 4.5 encontra-se a relação dos dispositivos descritos.

Tabela 4. 5 – Relação de equipamentos de controle

Dispositivo	Modelo	Fabricante
Controlador Lógico Programável (CLP)	MCI02-QC	HI Tecnologia
Inversor de frequência	VLT 2815	Danfoss
Inversor de frequência	VLT 2822	Danfoss
Inversor de frequência	VFE-D	Delta

4.1.3 Sistema Supervisório

Sistemas supervisórios monitoram e rastreiam informações de um processo produtivo ou instalações físicas coletadas através de equipamentos de aquisição de dados que podem ser manipulados, analisados, armazenados e apresentados ao usuário posteriormente. Para o monitoramento do sistema de refrigeração, foi utilizado inicialmente o Sistema Supervisório *InduSoft Web Studio 6.1* e posteriormente o MATLAB®/SIMULINK, realizando comunicação com um sistema inteligente de equipamentos de controle através de um CLP (Controlador Lógico Programável).

¹⁵ Linguagem de programação gráfica que representa ligações físicas entre componentes eletrônicos (sensores e atuadores)

4.1.4 A Comunicação via Protocolo OPC

A obtenção de dados em tempo real proveniente de sensores (temperatura, pressão, vazão, etc), comandos de controle (abrir, fechar, ligar, desligar, etc), *status* de comunicação, dados de desempenho e estatística do sistema será realizada através do padrão OPC.

4.2 Estudo da dinâmica e identificação do sistema

O principal objetivo em se verificar a dinâmica de um sistema é conhecer o comportamento, no tempo, das variáveis que o compõe, a fim de se verificar algumas características básicas deste sistema como: relações causa e efeito, tempos de resposta e efeito de realimentação. Analisando, minuciosamente, a dinâmica pode-se determinar algumas variáveis importantes para a identificação de sistemas como por exemplo: determinação de tempos de amostragem coerentes e tempos de assentamento.

4.2.1 Determinação das condições iniciais dos ensaios

O procedimento realizado na obtenção de dados experimentais, tanto para o levantamento da dinâmica das variáveis do processo, quanto para a identificação do sistema foi o mesmo. O procedimento baseou-se em ligar o sistema de refrigeração sem carga térmica seguindo os valores descritos na Tabela 4.6 e respeitando o tipo de condensação a ser utilizada. Quando as condições iniciais foram atingidas, adicionou-se uma carga térmica de 3000 W no sistema aguardando o primeiro estado estacionário e posteriormente realizou-se perturbações (em malha aberta) no sistema. Foram realizados ensaios utilizando o processo de condensação a ar e condensação a água.

Tabela 4. 6 – Condições iniciais utilizadas no procedimento de levantamento de dados

Condensação a ar	
<i>Variável</i>	<i>Valor inicial</i>
Frequência do Compressor (FQ101)	60 Hz
Frequência da Bomba do Evaporador (FQ201)	60 Hz
Temperatura do propilenoglicol (Tp)	0 a 5 °C
Condensação a água	
<i>Variável</i>	<i>Valor inicial</i>
Frequência do compressor (FQ101)	60 Hz
Frequência da bomba do evaporador (FQ201)	60 Hz
Frequência da bomba do condensador (FQ301)	60 Hz
Temperatura do propilenoglicol (Tp)	0 a 5 °C

4.2.2 Verificação da dinâmica das variáveis do sistema

Na verificação da dinâmica das variáveis do sistema realizaram-se ensaios seguindo os procedimentos iniciais citado no tópico 4.2.1 de acordo com os valores da Tabela 4.6.

4.2.2.1 Verificação da dinâmica no processo de condensação a ar

Para o processo de condensação a ar foram realizadas perturbações somente na rotação do compressor (*FQ101*), mantendo constantes a rotação da bomba do evaporador (*FQ201*) e a carga térmica (*Q*). As perturbações na frequência do compressor, para o processo de condensação a ar, foram realizadas entre 40 e 70 Hz tomando como frequência de referência 50 Hz, Tabela 4.7. Com o objetivo de analisar melhor a influência da frequência do compressor nas variáveis do sistema realizou-se perturbações com um *step* de 10 Hz e 20 Hz acima da frequência de referência (50 Hz). O mesmo procedimento seria adotado para as variações abaixo da frequência de

referência porém, o compressor semi-hermético, apresentou limitações técnicas (problemas de vibrações abaixo de 47 Hz). Um ensaio com frequência de 40 Hz foi realizado mas, para preservar a integridade física do compressor não se realizou outros ensaios abaixo de 50 Hz.

Tabela 4. 7 – Variação na frequência do compressor para condensação a ar

ENSAIO: Variação, acima de 50 Hz, na frequência do compressor (FQ101)	
<i>Variável</i>	<i>Valores</i>
Frequência da bomba do evaporador (FQ201):	60 Hz
Carga Térmica (Q):	3000 W
Frequência do compressor (FQ101)	50-60-50 Hz (variação) ^a
Frequência do compressor (FQ101)	50-70-50 Hz (variação) ^b
As perturbações a e b foram realizadas em ensaios diferentes	
ENSAIO: Variação, abaixo de 50 Hz, na frequência do compressor (FQ101)	
<i>Variável</i>	<i>Valores</i>
Frequência da bomba do evaporador (FQ201):	60 Hz
Carga Térmica (Q):	3000 W
Frequência do compressor (FQ101)	50-40 ^c -50 Hz (variação)
c: as limitações técnicas foram diagnosticada pelo setor de assistência técnica do fabricante.	

4.2.2.2 Verificação da dinâmica no processo de condensação a água

Para o processo de condensação a água, realizaram-se perturbações individuais, entre 50 e 70 Hz, na rotação do compressor (*FQ101*), tomando como rotação de referência 60 Hz, e entre 2000 e 4000 W na carga térmica (*Q*), adotando-se 3000 W como referência. A das bombas do evaporador (*FQ201*) e do condensador (*FQ301*) foram mantidas constantes. As perturbações realizadas no processo de verificação podem ser observadas nas Tabelas 4.8 e 4.9.

Tabela 4. 8 – Variação na frequência do compressor para condensação a água

ENSAIO: Variação, acima de 60 Hz, na frequência do compressor (FQ101)	
<i>Variável</i>	<i>Valores</i>
Frequência da bomba do evaporador (FQ201):	60 Hz
Frequência da bomba do condensador (FQ301):	60 Hz
Carga Térmica (Q):	3000 W
Frequência do compressor (FQ101)	60-70-60 Hz (variação)
ENSAIO: Variação, abaixo de 60 Hz, na frequência do compressor (FQ101)	
<i>Variável</i>	<i>Valores</i>
Frequência da bomba do evaporador (FQ201):	60 Hz
Frequência da bomba do condensador (FQ301):	60 Hz
Carga Térmica (Q):	3000 W
Frequência do compressor (FQ101)	60-50-60 Hz (variação)

Tabela 4. 9 – Variação na carga térmica para condensação a água

ENSAIO: Variação, acima de 3000 W, na carga térmica (Q)	
<i>Variável</i>	<i>Valores</i>
Frequência do compressor (FQ101)	60 Hz
Frequência da bomba do evaporador (FQ201):	60 Hz
Frequência da bomba do condensador (FQ301):	60 Hz
Carga Térmica (Q):	3.000-4.000-3.000 W
ENSAIO: Variação, abaixo de 3000 W, na carga térmica (Q)	
<i>Variável</i>	<i>Valores</i>
Frequência do compressor (FQ101)	60 Hz
Frequência da bomba do evaporador (FQ201):	60 Hz
Frequência da bomba do condensador (FQ301):	60 Hz
Carga Térmica (Q):	3.000-2.000-3.000 W

Além da limitação técnica do compressor em trabalhar com frequências entre 50-70 Hz, deparou-se com um problema relacionado ao processo de condensação a ar. Pelo fato do sistema de refrigeração encontrar-se acomodado dentro do laboratório a temperatura de condensação sofreu muitas interferências do meio, pois a temperatura da sala manteve-se elevada. Assim, optou-se em trabalhar somente com condensação a água.

É importante ressaltar que os ensaios realizados, descritos nesta seção foram utilizados apenas para uma análise macroscópica da influência das variáveis frequência do compressor ($FQ101$) e carga térmica (Q) no sistema de refrigeração. Para o processo de identificação do sistema foram realizados outros ensaios que são descritos na seção 4.2.3.

4.2.3 Identificação do sistema

Quando se deseja realizar uma identificação de sistema para a determinação de um modelo, nem sempre as informações disponíveis nos dados coletados, em condições normais de operação são suficientes, fazendo com que o modelo resultante seja pouco representativo. Assim, projetar sinais para perturbações do sistema é uma importante etapa na identificação de modelos para controle (COSTA, 2010).

Para o projeto de sinal para a identificação do sistema, realizou-se um estudo da dinâmica de suas variáveis, estipulando o tempo de amostragem e tempo de assentamento dos estados estacionários correspondentes a perturbações descritas nas Tabelas 4.8 e 4.9.

4.2.3.1 Estabelecimento do tempo de amostragem e tempo de assentamento das variáveis

O tempo de amostragem foi determinado heurísticamente analisando o desempenho dos modelos Takagi-Sugeno desenvolvidos na identificação ANFIS com tempos de 10 e 60 s.

4.2.3.2 Determinação do sinal para a identificação

Uma tendência cada vez maior é reconhecer a importância que um sinal de perturbação exerce sobre a identificação de sistema. Assim, o projeto de sinais que consigam obter uma varredura relevante para controle (identificando sistemas lineares ou não-lineares) tem sido muito estudado. Por exemplo, Vargas-Lara (2005) realizou um profundo estudo sobre projeto de sinais para a identificação de modelos para controladores preditivos.

Quando não há condições de se obter conhecimento sobre as variáveis de um processo a ser modelado, pode ser interessante o uso de sinais aleatórios. Porém, seu uso apresenta dificuldades práticas como, por exemplo, o comprimento do sinal pode não perturbar a largura de faixa de interesse para controle quando não se tem conhecimento do sistema, (AGUIRRE, 2000). Quando há o conhecimento do sistema, uma solução para esse problema é a utilização de um sinal de entrada do tipo pseudoaleatório. Este tipo de sinal facilita a especificação de uma faixa de frequência que terá influência direta com o controlador (VARGAS-LARA, 2005). Em princípio, um sinal pseudoaleatório foi proposto para a identificação, porém, o comprimento da faixa de varredura, baseada no tempo de assentamento das variáveis T_e (temperatura de evaporação) e T_p (temperatura do propilenoglicol), apresentou-se muito extensa (aproximadamente 200 h).

Assim, o projeto de sinal para a identificação do sistema foi baseado em um sinal aleatório. O sinal aleatório foi gerado a partir do bloco “*Uniform Random Number*” do MATLAB/SIMULINK® para as variáveis (Figura 4.3).

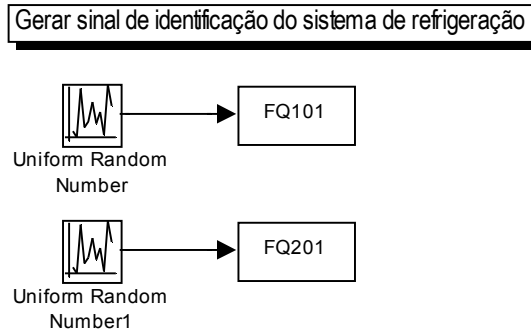


Figura 4. 3 – Sinal randômico utilizado na identificação do sistema (“Uniform Random Nunber”)

O bloco “*Uniform Random Number*” gera um sinal contendo números aleatórios uniformemente distribuídos em um intervalo especificado a partir de um ponto específico (*seed*=semente). Este ponto de partida é reiniciado cada vez que uma simulação começa. A mudança do sinal será dada a partir da Equação 4.1, (SEBORG, 2004).

$$t_{sw} = t_{st}/3 \quad (\text{Eq. 4.1})$$

onde: t_{sw} é o tempo de mudança do sinal, t_{st} é o tempo de assentamento.

4.2.3.3 Modelagem do Sistema

Para identificação do sistema foi utilizada a arquitetura ANFIS (*Adaptative Network based Fuzzy Inference Systems*), proposta por Jang (1993; 1995). Foram determinados dois conjuntos de modelos Takagi-Sugeno (TS) para a identificação do sistema de refrigeração.

Identificação I: A primeira identificação foi realizada no sistema que continha um compressor aberto utilizando o processo de condensação a ar. Os dados utilizados para o

modelo foram obtidos por Dall'Agnol (2010). Esta identificação teve como foco principal a viabilidade da utilização da ferramenta de identificação ANFIS.

A estrutura da arquitetura ANFIS, utilizada para a primeira identificação, Figura 4.4, foi composta por quatro entradas $[x_1, x_2, x_3, x_4]$ e foram desenvolvidos três modelos de predição, onde a saída y é: $y = T_{cond_k}$ para o modelo de predição da temperatura de condensação, $y = T_{evap_k}$ para o modelo de predição da temperatura de evaporação e $y = T_{prop_k}$ para a o modelo de predição da temperatura do fluido água-propilenoglicol. As variáveis da arquitetura ANFIS são descritas na Tabela 4.10.

Tabela 4. 10 – Variáveis de entrada e de saída da arquitetura ANFIS para os Modelos TS da temperatura de evaporação, de condensação e do propilenoglicol.

Modelo TS para predição da temperatura de evaporação	
Variáveis	Descrição
$x_1 = FQ101$	frequência do compressor
$x_2 = FQ201$	bomba de evaporação
$x_3 = T_{peev}$	temperatura do propilenoglicol na entrada do evaporador
$x_4 = T_{evap_{(k-1)}}$	temperatura de evaporação no instante k-1
$y = T_{evap_k}$	temperatura de evaporação
Variáveis do Modelo TS para predição da temperatura de condensação	
Variáveis	Descrição
$x_1 = FQ101$	frequência do compressor
$x_2 = FQ201$	bomba de evaporação
$x_3 = T_{peev}$	temperatura do propilenoglicol na entrada do evaporador
$x_4 = T_{cond_{(k-1)}}$	temperatura de condensação no instante k-1
$y = T_{cond_k}$	temperatura de condensação
Variáveis do Modelo TS para predição da temperatura do propilenoglicol	
Variáveis	Descrição
$x_1 = FQ101$	frequência do compressor
$x_2 = FQ201$	bomba de evaporação
$x_3 = T_{peev}$	temperatura do propilenoglicol na entrada do evaporador
$x_4 = T_{prop_{(k-1)}}$	temperatura do propilenoglicol no instante k-1
$y = T_{prop_k}$	temperatura do propilenoglicol

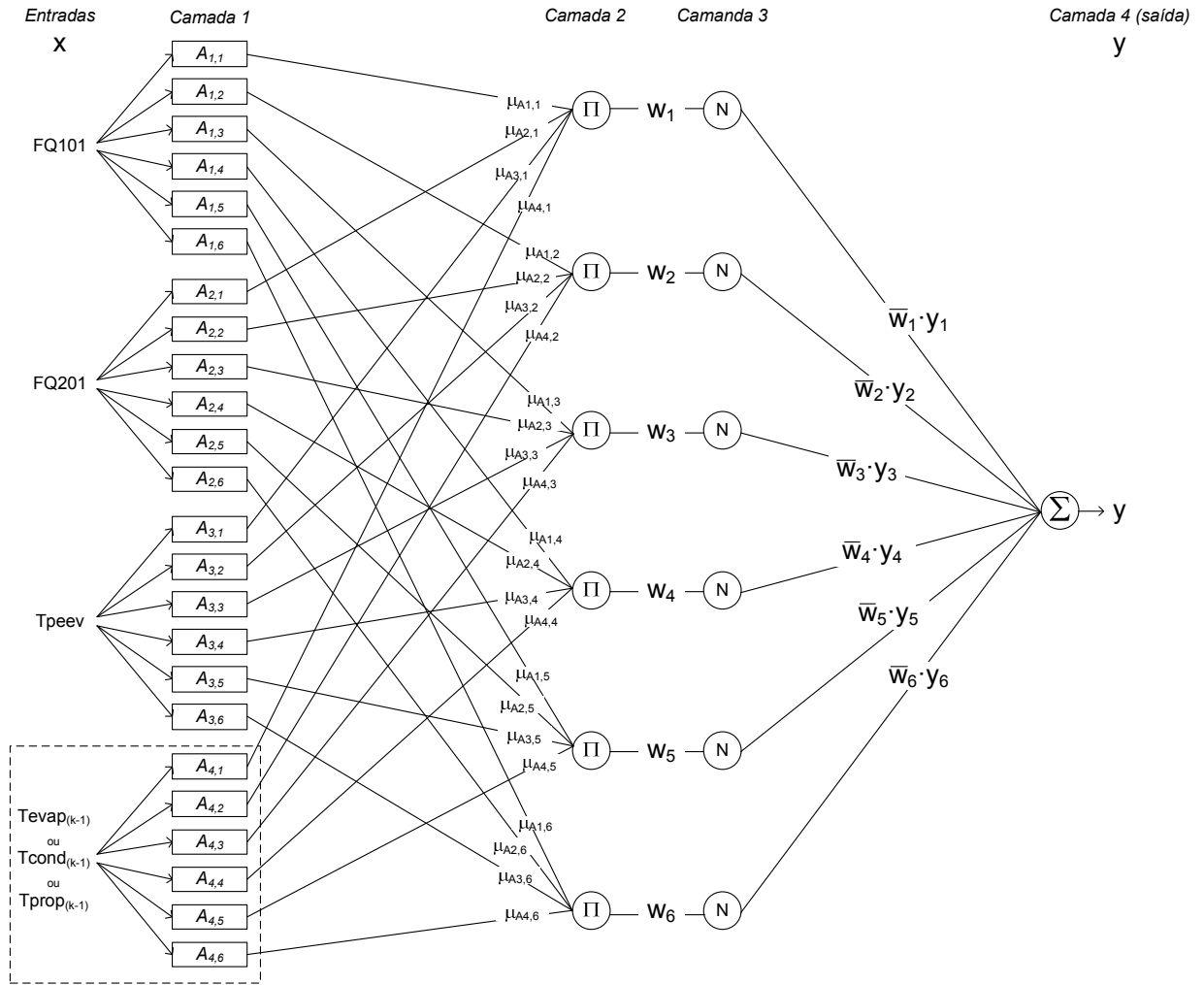


Figura 4. 4 – Estrutura ANFIS adotada para a primeira identificação

Identificação II: A segunda identificação foi realizada no sistema contendo um compressor semi-hermético, utilizando o processo de condensação a água. Os dados para a determinação dos modelos foram obtidos após a realização de uma análise do sistema e utilizando o sinal aleatório descrito no *Tópico 4.2.3.2*.

Para a segunda identificação foram desenvolvidos 4 modelos SISO (*Single-Input-Single-Output*) para a predição das temperaturas de evaporação (T_e) e do propilenoglicol (T_p). Os modelos estão divididos em dois grupos. No *Grupo I* foram desenvolvidos modelos de predição das temperaturas de evaporação e do propilenoglicol, tendo como variável manipulada a frequência do compressor (FQ101); No *Grupo II* desenvolveu-se modelos de predição das temperaturas de evaporação e do propilenoglicol, tendo como variável manipulada a frequência da bomba de evaporação (FQ201).

Para o *Grupo I*, propôs-se uma arquitetura ANFIS composta por cinco entradas $[x_1, x_2, x_3, x_4, x_5]$ e foram desenvolvidos dois modelos de predição Takagi-Sugeno (TS), onde a saída y é: $y = T_{e(k)}$ para o modelo de predição da temperatura de evaporação e $y = T_{p(k)}$ para o modelo de predição da temperatura do propilenoglicol, Figura 4.5. Na Tabela 4.11 pode-se verificar as variáveis de entradas e saída de cada modelo ANFIS.

Tabela 4. 11 - Variáveis de entrada de saída da arquitetura ANFIS para os Modelos TS da temperatura de evaporação do propilenoglicol do Grupo I

Modelo TS para predição da temperatura de evaporação (MV:FQ101)	
Variáveis	Descrição
$x_1 = FQ101_{(k-1)}$	frequência do compressor no instante k-1
$x_2 = FQ101_{(k-2)}$	frequência do compressor no instante k-2
$x_3 = FQ101_{(k-3)}$	frequência do compressor no instante k-3
$x_4 = T_{e(k-1)}$	temperatura de evaporação no instante k-1
$x_5 = T_{e(k-2)}$	temperatura de evaporação no instante k-2
$y = T_{e(k)}$	temperatura de evaporação
Variáveis do Modelo TS para predição da temperatura do propilenoglicol (MV:FQ101)	
Variáveis	Descrição
$x_1 = FQ101_{(k-1)}$	frequência do compressor no instante k-1
$x_2 = FQ101_{(k-2)}$	frequência do compressor no instante k-2
$x_3 = FQ101_{(k-3)}$	frequência do compressor no instante k-3
$x_4 = T_{p(k-1)}$	temperatura de evaporação no instante k
$x_5 = T_{p(k-2)}$	temperatura de evaporação no instante k-1
$y = T_{p(k)}$	temperatura de evaporação

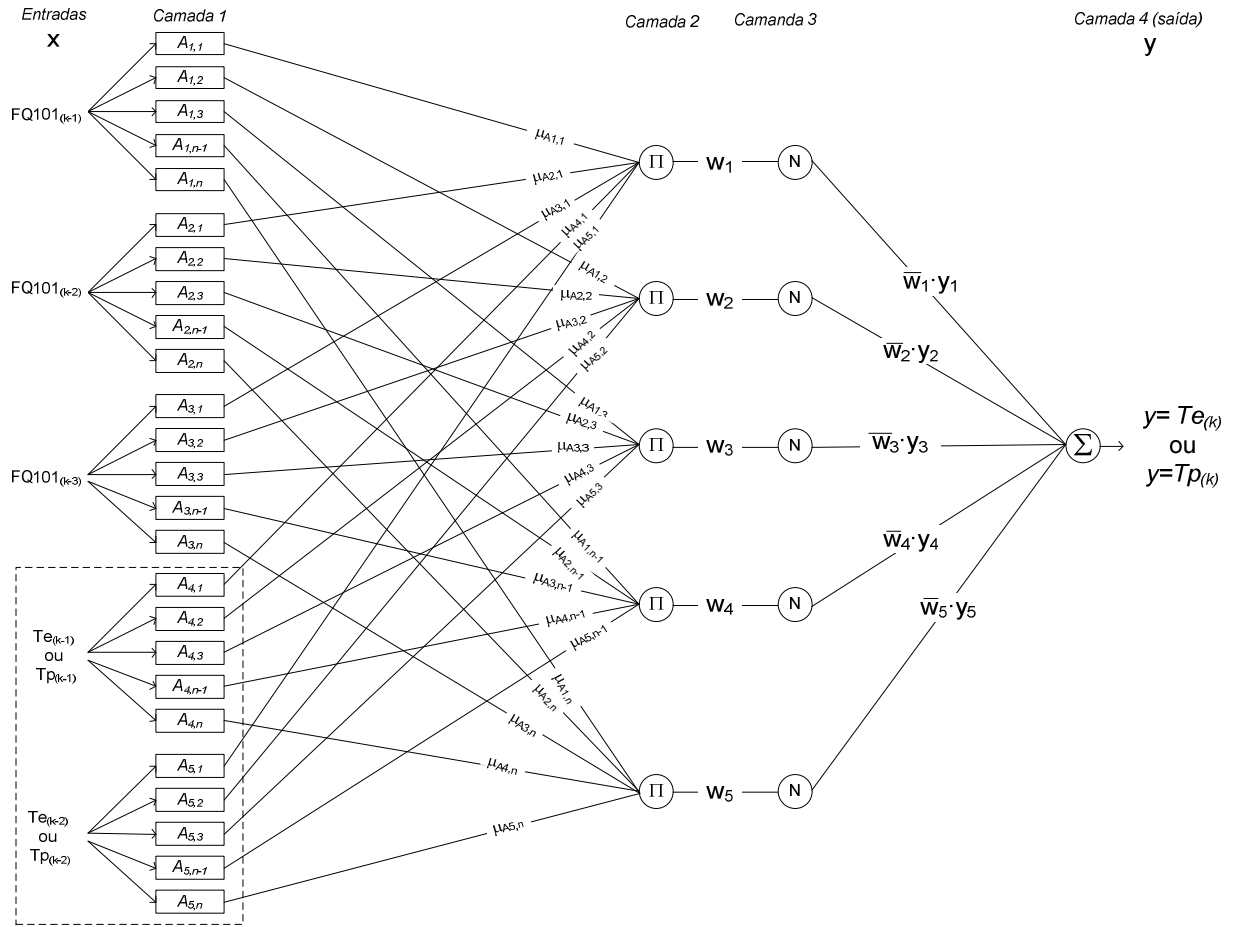


Figura 4. 5 – Estrutura ANFIS adotada para o Grupo I da segunda identificação

Para o Grupo II foi proposta uma arquitetura ANFIS composta por cinco entradas $[x_1, x_2, x_3, x_4, x_5]$ e foram desenvolvidos dois modelos de predição TS, onde a saída y é: $y = Te_{(k)}$ para o modelo de predição da temperatura de evaporação e $y = Tp_{(k)}$ para o modelo de predição da temperatura do propilenoglicol conforme verificado na Figura 4.6. As variáveis de entrada e de saída de cada modelo ANFIS podem ser verificadas na Tabela 4.12.

Tabela 4. 12 - Variáveis de entrada de saída da arquitetura ANFIS para os Modelos TS da temperatura de evaporação do propilenoglicol do Grupo II

Modelo TS para predição da temperatura de evaporação (MV:FQ201)	
Variáveis	Descrição
$x_1 = FQ201_{(k-1)}$	frequência da bomba do evaporador no instante k-1
$x_2 = FQ201_{(k-2)}$	frequência da bomba do evaporador no instante k-2
$x_3 = FQ201_{(k-3)}$	frequência da bomba do evaporador no instante k-3
$x_4 = Te_{(k-1)}$	temperatura de evaporação no instante k-1
$x_5 = Te_{(k-2)}$	temperatura de evaporação no instante k-2
$y = Te_{(k)}$	temperatura de evaporação
Variáveis do Modelo TS para predição da temperatura do propilenoglicol (MV:FQ201)	
Variáveis	Descrição
$x_1 = FQ201_{(k-1)}$	frequência da bomba do evaporador no instante k-1
$x_2 = FQ201_{(k-2)}$	frequência da bomba do evaporador no instante k-2
$x_3 = FQ201_{(k-3)}$	frequência da bomba do evaporador no instante k-3
$x_4 = Tp_{(k-1)}$	temperatura de evaporação no instante k
$x_5 = Tp_{(k-2)}$	temperatura de evaporação no instante k-1
$y = Tp_{(k)}$	temperatura de evaporação

Observando-se as Tabelas 4.11 e 4.12 nota-se que, dentre as variáveis de entrada que compõe a estrutura ANFIS, tanto para os modelos TS para a predição da temperatura do propilenoglicol quanto para a temperatura de evaporação, há a variável de saída medida nos instantes (k-1) e (k-2). Os modelos TS desenvolvidos para as predições da segunda identificação (Grupos I e II) serão utilizados como modelos preditivos para controle da planta de refrigeração e, por isto, os mesmos devem conter as variáveis de saída em instantes anteriores em sua composição.

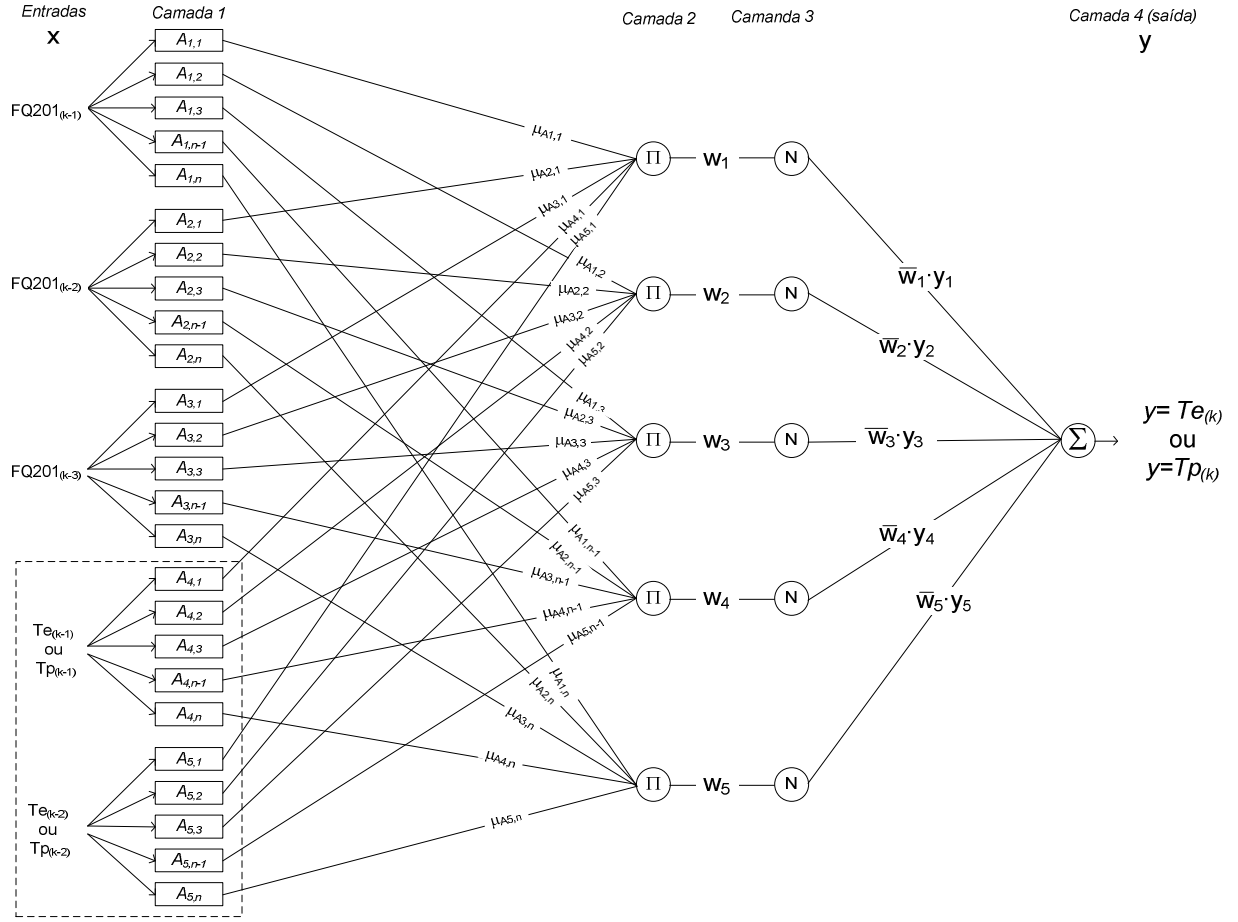


Figura 4. 6 – Estrutura ANFIS adotada para o *Grupo II* da segunda identificação

5. Resultados e Discussões

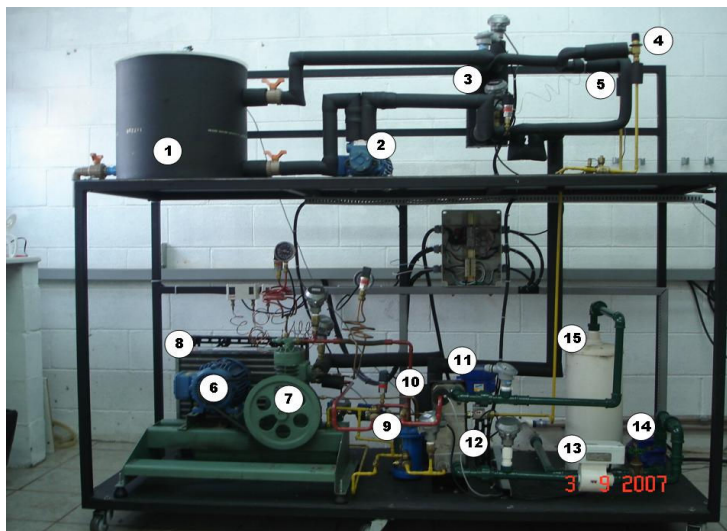
5.1 Melhorias no protótipo de refrigeração

Conforme apresentado por Pinelli (2008), o sistema original apresentava uma estrutura frágil, onde as distribuições de forças atuantes não foram corretamente realizadas, resultando assim em problemas de ruídos e segurança, Figura 5.1(a). Devido a este fato, o primeiro aperfeiçoamento, realizado em conjunto com Pinelli no sistema de refrigeração, foi uma mudança estrutural (com reconfiguração do sistema) e acrescentando novos sensores de medição de temperatura e vazão de R22, Figura 5.1(b). O sistema continha, dentre seus componentes, um compressor Bitzer tipo aberto da série III (1,5 kW). Este tipo de compressor possui o motor separado e isto faz com que os controladores desenvolvidos não apresentem bom desempenho. Isto se observou em trabalhos realizados por Pinelli (2008) e Dall’Agnol (2010).

Um segundo aperfeiçoamento (novamente realizado em conjunto com Pinelli) do sistema de refrigeração se deu adicionando um medidor de vazão tipo turbina para a medição da vazão volumétrica de propilenoglicol e o compressor aberto existente foi substituído por um compressor Bitzer semi-hermético da série octagon, Figura 5.2. Com a substituição do compressor houve a necessidade de se adicionar um novo inversor de frequência mais robusto devido a alta corrente nominal de partida do motor do novo compressor.



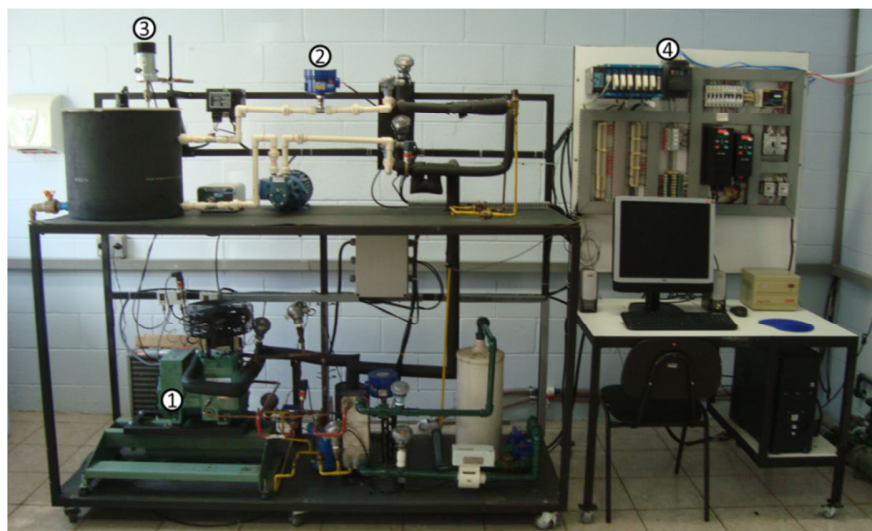
(a)



(b)

1) tanque de resfriamento de propilenoglicol; 2) bomba de evaporação; 3) evaporador de placas; 4) válvula de expansão manual; 5) válvula de expansão termostática; 6) motor elétrico do compressor; 7) compressor tipo aberto; 8) condensador de tubos; 9) separador de líquido; 10) separador de óleo; 11) medidor de vazão tipo turbina (R22); 12) condensador de placas; 13) medidor de vazão magnético; 14) bomba de condensação

Figura 5. 1 – Módulo de refrigeração: a) original e b) Após primeiro aperfeiçoamento



1) compressor semi-hermético; 2) medidor de vazão tipo turbina; 3) agitador; 4) inversor de frequência para o novo compressor

Figura 5. 2 – Módulo de refrigeração após segundo aperfeiçoamento

5.2 Instrumentação do sistema de refrigeração

Devido às modificações realizadas no protótipo de refrigeração, houve a necessidade de se desenvolver novamente toda a programação do CLP e refazer a identificação de todos os *tags* do sistema de refrigeração. Nas Tabelas 5.1 a 5.3 pode-se verificar identificação dos *tags* e o seus endereçamentos no CLP. O código LADDER encontra-se no *APÊNDICE D*.

Tabela 5. 1 – Endereçamento das entradas analógicas

Cartão AIM ^a		
Endereço CLP	Tag	Descrição
E0	FT_101	Vazão de R22
E1	FT_201	Vazão de propilenoglicol no evaporador
E2	FT_301	Vazão de propilenoglicol (sistema secundário de troca de calor)
E3	PT_101	Pressão de descarga
E4	PT_102	Pressão de condensação
E5	PT_103	Pressão de evaporação
E6	PT_104	Pressão de sucção
E7	TT_101	Temperatura de descarga
E8	TT_102	Temperatura de condensação (água)
E9	TT_103	Temperatura de condensação (ar)
E10	TT_104	Temperatura do R22 na entrada do evaporador (Te)
E11	TT_105	Temperatura de R22 na saída do evaporador
E12	TT_106	Temperatura de sucção
E13	TT_201	Temperatura do propilenoglicol na entrada do evaporador
E14	TT-201	Temperatura do propilenoglicol na saída do evaporador
E15	TT_301	Temperatura da água na entrada do condensador de placas
E16	TT_302	Temperatura da água na saída do condensador de placas
E17	TT_303	Temperatura da água na entrada do condensador casco e tubo
E18	TT_304	Temperatura da água na saída do condensador casco e tubo
E19	TT_401	Temperatura da água na entrada da torre de resfriamento
E20	TT_402	Temperatura da água na saída da torre de resfriamento
E21	TE_101	Temperatura do R22 na entrada da válvula de expansão
E22	TE_102	Temperatura do R22 na entrada do filtro secador
E23	TE_103	Temperatura do R22 na entrada do medidor de vazão
E24	IC_101	Corrente do compressor
^a Analogic Input Memory		

Tabela 5. 2 – Endereçamento das saídas analógicas

Cartão AOM ^b		
Endereço CLP	Tag	Descrição
S0	FQ_201	Frequência da bomba do evaporador
S1	FQ_301	Frequência da bomba do condensador a placas
S2	FQ_101	Frequência do compressor
S3	POT_RES	Potência da resistência elétrica

^b Analogic Output Memory

Tabela 5. 3 – Endereçamento das saídas digitais

Cartão DOM ^c -1		
Endereço CLP	Tag	Descrição
O8	R0	Ligar bomba da torre de resfriamento
O9	R1	Ligar exaustor da torre de resfriamento
O10	R2	Ligar resistência elétrica
O11	R3	Ligar ventilador do condensador a ar
O12	R4	Ligar compressor
O13	R5	Ligar ventilador do compressor

^d Digital Output Memory

5.3 Monitoramento do sistema de refrigeração – Sistema Supervisório

5.3.1 Supervisão com *InduSoft Web Studio 6.1*

Em princípio foi desenvolvido um novo sistema supervisório, utilizando o *InduSoft Web Studio 6.1*, para realizar a obtenção de dados com o sistema de refrigeração. Essa comunicação é responsável em obter dados em tempo real de sensores de temperatura, pressão, vazão entre outros e realizará comandos de controle tipo liga/desliga do sistema de refrigeração em questão.

A fase de engenharia do sistema supervisorio foi constituída das seguintes tarefas:

1. Definições dos tipos de *tags*: classes, *array*;
2. Desenvolvimento de telas;
3. Desenvolvimento de planilhas e funções matemáticas, alarmes e histórico, gráficos de tendências *on-line* e gráfico de tendência histórico e banco de dados;
4. Comunicação com o CLP;
5. Configuração do servidor OPC.

A Figura 5.3 apresenta a tela principal do Sistema Supervisorio.

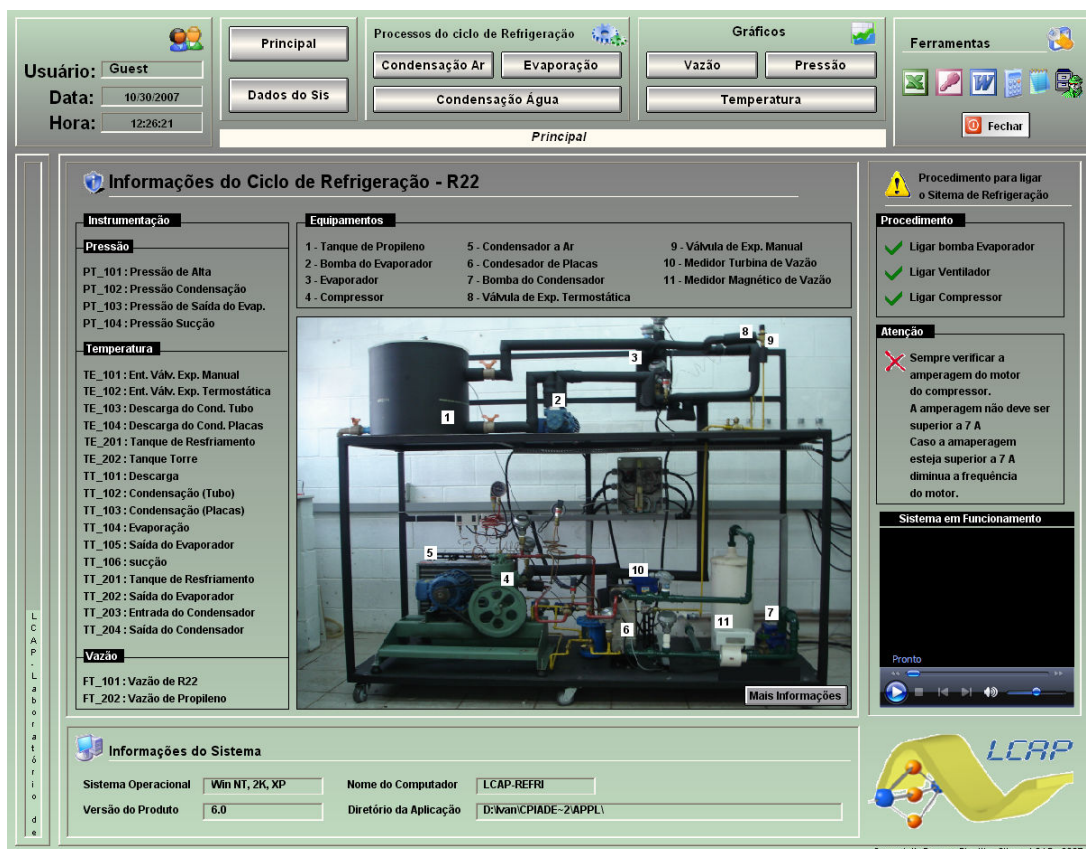
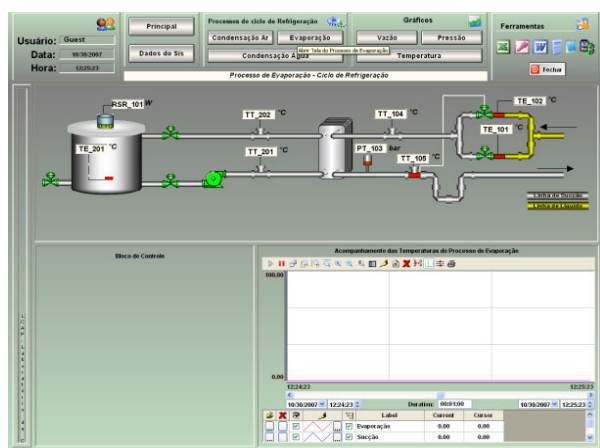
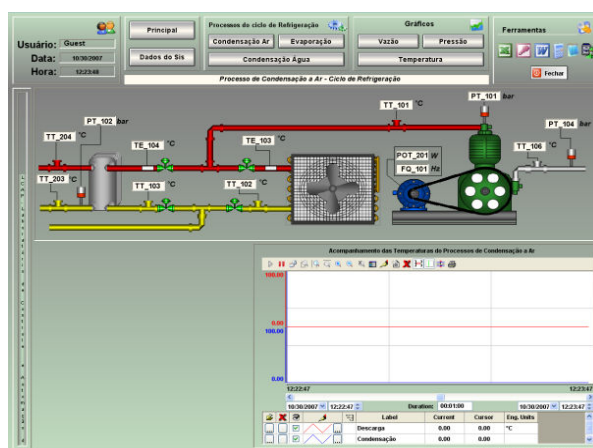


Figura 5. 3 – Tela principal do sistema supervisorio (*InduSoft Web Studio 6.1*)

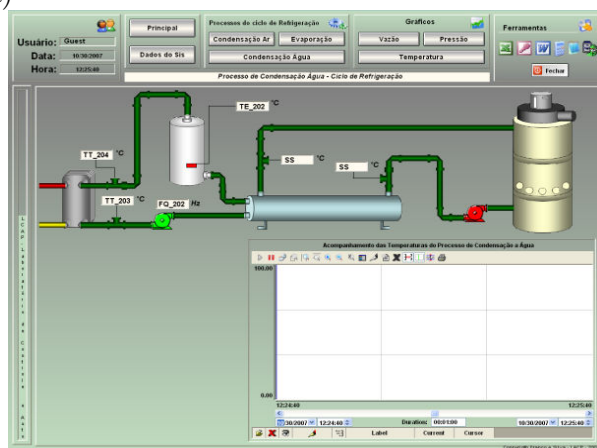
A Interface Homem-Máquina (IHM) foi realizada em todos os processos do ciclo de refrigeração (Processo de Evaporação, Processo de Condensação a Ar e Processo de Condensação a água) apresentados em forma numéricas ou através de gráficos “*real-time*”, Figuras (5.4a-5.4c). A aquisição de dados experimentais foi armazenada em um banco de dados criado na fase de engenharia do sistema supervisorio.



(a)



(b)



(c)

Figura 5. 4 – a) Tela do processo de evaporação; b) Tela do processo de condensação a ar e c) Tela do processo de condensação a água.

5.3.2 Interface de comunicação MATLAB®/SIMULINK-Sistema de Refrigeração via protocolo OPC

Um sistema de controle moderno necessita mais do que uma simples ferramenta de configuração e monitoramento. Necessita de desenvolvimento de algoritmos utilizando-se de técnicas avançadas de controle. Para isso, a emprego de um *software* matemático iterativo de alta performance apropriada ao desenvolvimento de aplicativos de natureza técnica é fundamental para trabalhos em que se desejam implementar e testar soluções com facilidade e precisão. No presente trabalho, o MATLAB® foi utilizado pois, além dele ser *software* iterativo de alta performance para cálculos científicos, apresenta também uma interface gráfica de fácil compreensão e dispõe de uma biblioteca abrangente de funções matemáticas e “*toolboxes*”.

O MATLAB® possui “*toolboxes*” com algoritmos pré-programados para conhecimentos específicos. Na comunicação MATLAB®/SIMULINK-Sistema de Refrigeração para que os controladores avançados, desenvolvidos também em MATLAB®, atuem no sistema de controle foi utilizada a “*OPC toolbox*”. A “*OPC toolbox*” é uma coleção de funções que estendem a potencialidade do MATLAB® podendo adquirir dados do “*Server OPC*” e escrever dados diretamente ao “*Client OPC*”. Uma vez estabelecida a conexão entre o usuário e o servidor OPC pode-se monitorar e adicionar valores ao servidor OPC.

5.3.2.1 Configuração do servidor OPC

A primeira etapa para a comunicação OPC é ter disponível um servidor OPC instalado local ou remotamente. Neste caso, utilizou-se o servidor OPC

Scada.Server.OPC do *InduSoft Web Studio 6.1*. Em seguida, deve-se fazer a configuração do servidor OPC DA de escrita (*OPC DA Write Server*) e do servidor OPC DA de leitura (*OPC DA Read Server*) criando seus grupos e itens, como apresentado na Figura 5.5. O grupo é uma forma apropriada de organização dos dados utilizados no sistema de controle. A interface do grupo permite à aplicação: adicionar e remover itens do grupo; definir a taxa de leitura dos dados no grupo (cada grupo de dados pode ter uma taxa de leitura específica); ler e escrever valores para os itens do grupo. Os itens são os próprios *tags*. São os objetos que proporcionam uma conexão com uma entrada física de dados, Figura 5.6.

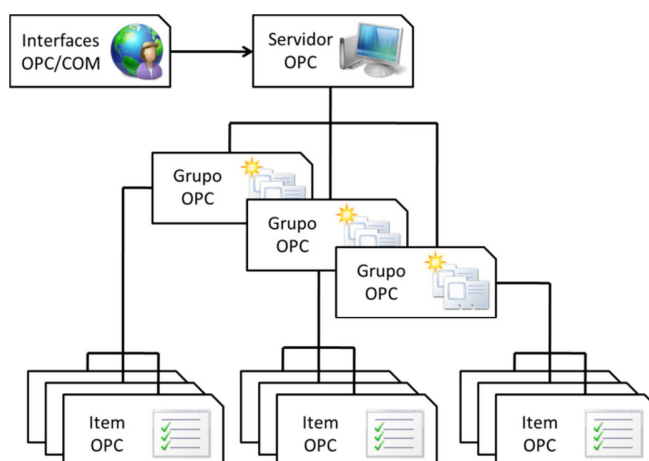


Figura 5. 5 - Hierarquia da criação dos grupos e itens da comunicação via protocolo OPC

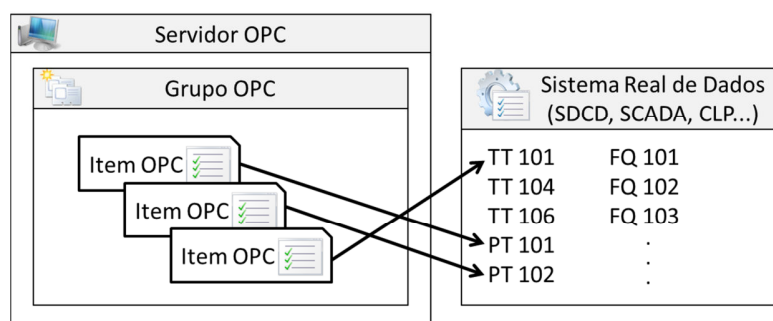


Figura 5. 6 – Mapeamento de itens OPC no sistema real de dados

5.3.2.2 Teste da qualidade da comunicação

Para a utilização do MATLAB® como supervisor no sistema de refrigeração, realizou-se um estudo da qualidade da comunicação quando conectado, o MATLAB®, via protocolo OPC ao sistema. A obtenção de dados em tempo real proveniente de sensores (temperatura, pressão, vazão, etc.), comandos discretos (abrir, fechar, ligar, desligar, etc.), *status* de comunicação, dados de desempenho e estatística do sistema, foi realizado através da comunicação do MATLAB®/SIMULINK-CLP, via padrão OPC.

Todos os sistemas supervisórios têm sua forma particular de apresentar a qualidade de conexão entre o CLP e o processo. Muitos deles apresentam essa qualidade da forma “BAD” (quando não há sinal retornando para o CLP) e “GOOD” (quando há sinal retornando para o CLP). Quando se utiliza o *software* MATLAB®/SIMULINK através da comunicação OPC essa qualidade é apresentada por um conjunto de arranjos binários na forma “QQSSSSL”, onde “QQ” representa a qualidade principal da comunicação, “SSSS” representa o substatus da qualidade da comunicação e “LL” representa o *status* do limite da comunicação (MATLAB® & SIMULINK, 2004-2007). Na Tabela 5.4 encontra-se descrito o significado do conjunto “QQ” (o mais importante dos arranjos). Os significados dos arranjos “SSSS” e “LL” podem ser verificados em MATLAB® & SIMULINK (2004-2007), e não serão descritos aqui por apresentarem muitos valores para análise. Porém, os valores padrão e que demonstram boa qualidade de comunicação são SSSS=0 e LL=0.

Tabela 5. 4 – Representação da qualidade da comunicação para o conjunto de arranjo QQ

Valor	Qualidade	Descrição
0 (zero)	BAD	Quando não há sinal retornando para o CLP
1 (um)	INCERTO	A razão da incerteza é indicada pelo <i>substatus</i> do sinal
3 (três)	GOOD	Quando há sinal retornando para o CLP

Nos resultados apresentados, o valor da qualidade para o teste da comunicação é 192 em decimal, o que equivale à “11000000” em binários (QQ=11, SSSS=0000, LL=00), ou seja, a qualidade principal da comunicação (QQ) é “11” em binário, o equivalente a 3 decimal, o substatus da comunicação (SSSS) é “0000” o equivalente a 0 decimal e o *status* do limite da comunicação (LL) é “00” o equivalente a 0 decimal. Assim, o valor 192 indica boa comunicação entre o *software* e o sistema de refrigeração, via protocolo OPC.

Como exemplo pode-se observar nas Figuras 5.7 a 5.10, os valores obtidos no teste de comunicação para os sensores *TT_101* (temperatura de descarga da saída do compressor), *TT_104* (temperatura de evaporação), *TT_106* (temperatura de sucção do compressor), *PT_103* (pressão da saída do evaporador) e *FQ_101* (frequência do motor do compressor) respectivamente, onde a qualidade da comunicação apresentada foi de 192, o que representa QQ=GOOD, SSSS=NÃO ESPECIFICADO (Qualidade do sinal GOOD porém não há condições especial de status) e LL=SEM LIMITES, do começo ao fim do andamento do experimento.

Os *tags* relacionados com os sensores de temperatura (*TT_101*, *TT_104* e *TT_106*) e pressão (*PT_103*) representam *tags* apenas de leitura (recebem informações) no sistema de refrigeração; na comunicação via protocolo OPC são denominadas “*read OPC DA itens*”. Já o *tag* relacionados com inversores de frequência (*FQ_101*) representa *tags* de escrita (enviam informações) no sistema de refrigeração e para o protocolo OPC são denominados “*write OPC DA itens*”. Analisando as Figuras 5.7 a 5.10 verifica-se que tanto os *tags* de leitura com os de escrita apresentam qualidade na

comunicação, pois apresentaram o valor de 192 para em todo o intervalo de amostragem e também pode-se verificar que a comunicação não apresenta distorções (pontos muito fora do perfil da variável lida ou escrita).

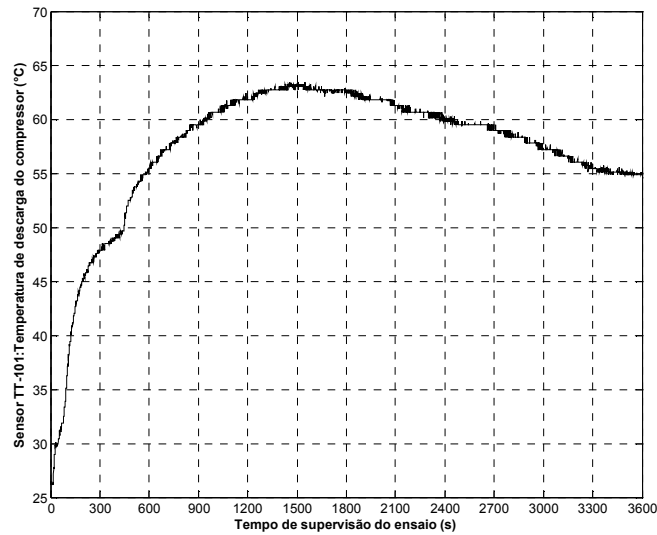


Figura 5. 7 – Qualidade da comunicação para o sensor TT_101 (temperatura de descarga)

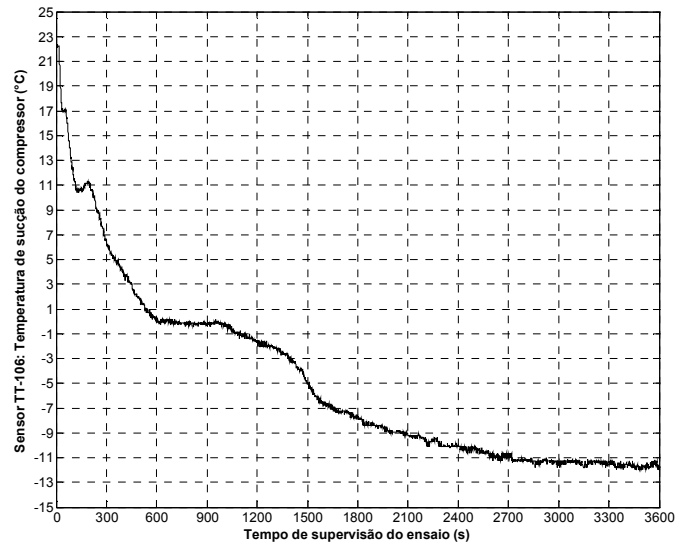


Figura 5. 8 – Qualidade da comunicação para o sensor TT_106 (temperatura de sucção)

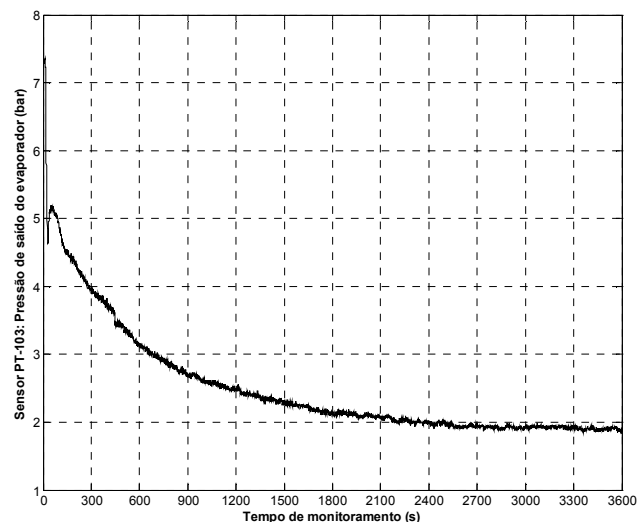


Figura 5. 9 – Qualidade da comunicação para o sensor PT_103 (pressão relativa de evaporação)

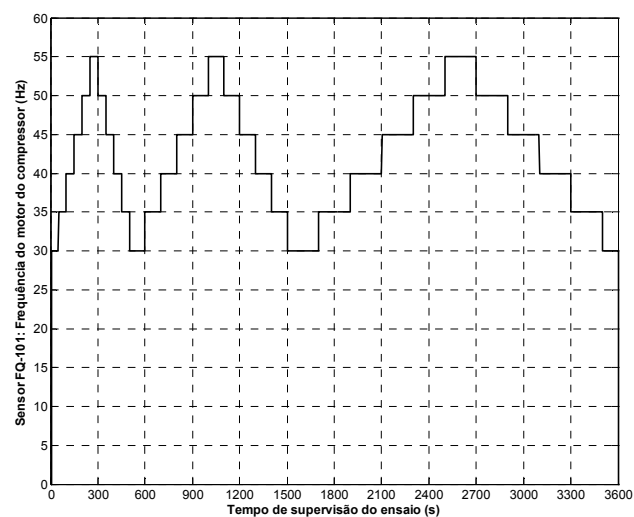


Figura 5. 10 – Qualidade da comunicação para o sensor FQ_101 (frequência do motor do compressor)

Quando se estudam sistemas de controle de processos químicos, um dado importante é o tempo de resposta do sistema ao controle. Quando são utilizados sistemas supervisórios convencionais e *drivers* proprietários de controladores, esta resposta (baseando-se em resultados práticos de indústrias) é em tempo real. Mas quando utilizado um *software* matemático para esse fim, deve-se fazer uma análise do tempo

necessário para o *software* enviar a informação ao CLP e recebê-la de volta e se o tempo de “simulação” no experimento está compatível com o tempo de execução do *software*. O tempo de “simulação” é o tempo de execução do *software* matemático (ex: Para um experimento de 1 h ou 3600 s o tempo de simulação será 3600 s no software).

No caso do MATLAB®/SIMULINK o tempo necessário para o *software* enviar e receber as informações do CLP é fornecido pelo “Pseudo Real-Time”. Ele verifica o tempo de espera decorrido do disparo do pulso e a execução no sistema durante cada etapa. Caso o valor do “Pseudo Real-Time” venha a ser negativo, isto indica que a simulação esta muito mais lenta do que o tempo real, com isso devem ser feitas algumas configurações na comunicação OPC, ou seja, configurar parâmetros do bloco OPC mais especificamente o “*speedup*” da simulação. Nas Figuras 5.11 e 5.12, pode-se verificar essa análise de tempo de envio e recebimento de informação entre o *software* e o CLP e o tempo real de execução.

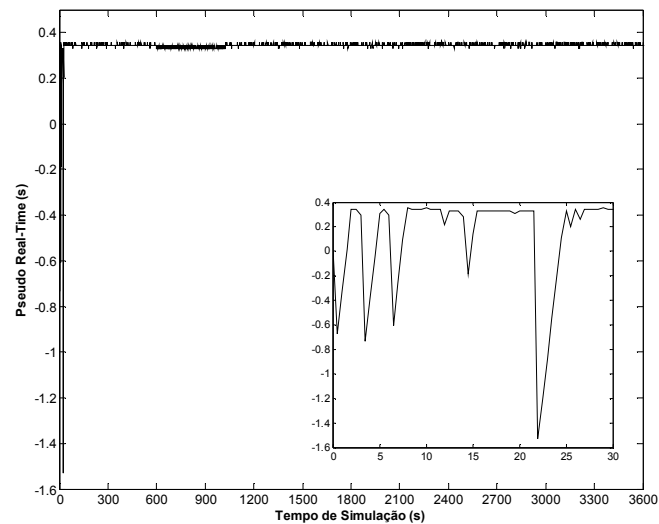


Figura 5. 11 – Pseudo Real-Time: Tempo de envio e recebimento de informações do *software* e CLP utilizando protocolo de comunicação OPC

Observando a Figura 5.11, nota-se que para um intervalo curto de tempo (30 s) a comunicação do *software* e o CLP via OPC tem valores negativos o que indica que o tempo de simulação está muito mais lento do que o tempo real de execução, ou seja, há uma grande defasagem entre o envio e recebimento de informações entre o CLP e o *software*. Porém, esse curto intervalo de tempo pode ser considerado um tempo mínimo para que o CLP e o *software* estejam em sincronia, podendo ser desprezado. Ainda na Figura 5.11, observa-se que a partir de 30 s, essa defasagem não existe, apresentando um “Pseudo Real-Time” médio de 0,35 s, ou seja, o tempo para o envio e recebimento de informações entre o software e o CLP é de 350 ms fazendo com que o tempo de simulação seja praticamente o tempo real de execução. Na Figura 5.12 pode-se confirmar essa rapidez de troca de informações entre o *software* e o CLP.

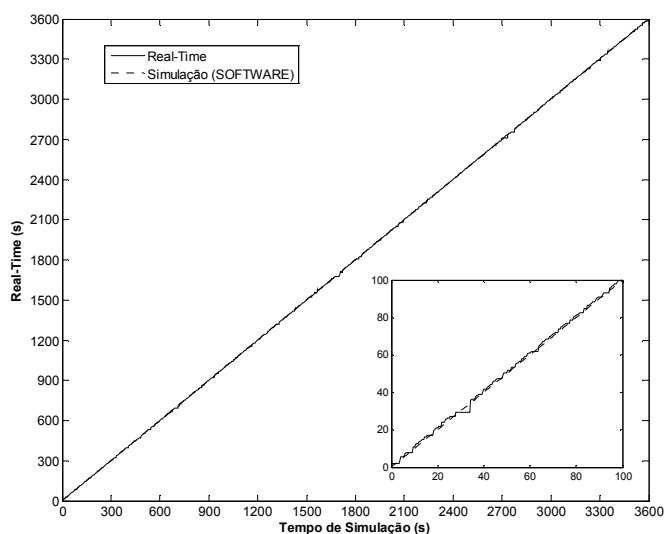


Figura 5. 12 – Real-Time: Tempo real de execução do *software* e a comunicação com o CLP via protocolo OPC

Os testes realizados, enfatizando a comunicação do *software*, foram satisfatórios, pois, verifica-se que a comunicação entre o *software* e o processo apresentou uma

qualidade de comunicação muito boa, segundo os critérios de avaliação de qualidade do *software*. Em relação ao tempo necessário para que o *software* envie informações ao CLP e a receba de volta, ou seja, o “Pseudo Real-Time”, conclui-se que o tempo de espera decorrido entre o disparo do pulso e a execução no sistema durante de cada etapa é praticamente o tempo real de execução. Assim, o *software* e o CLP através do padrão OPC, fornecem uma troca de informações confiável e com uma velocidade de 350 ms, podendo ser utilizado como um “sistema supervisorio”, mas não um simples “supervisorio” e sim uma ferramenta de monitoramento e desenvolvimento de controles avançados como, por exemplo, controle preditivo baseado em modelo (MPC)

5.3.3 Sistema de supervisão utilizando o MATLAB/SIMULINK

Com a realização dos testes de comunicação entre o *software* e o CLP e a confirmação de que foi viável realizar este tipo de comunicação, foi desenvolvido o SISMOCAR (SIStema de MONitoramento e Controle Avançado para Refrigeração), supervisorio utilizando MATLAB®/SIMULINK. A Figura 5.13 representa a tela principal do SISMOCAR¹⁶. O supervisorio foi dividido em cinco partes distintas: 1) **Grupo de escrita:** onde estão presentes todas as variáveis manipuladas do processo; 2) **Grupo de leitura:** onde é realizada toda a aquisição de dados; 3) **Cálculos *on-line*:** onde são realizados cálculo, em tempo real (on-line) de variáveis importantes do sistema; 4) **Monitoramento gráfico:** onde são gerados os gráficos em tempo real das variável de importância do sistema e; 5) **Data Save:** onde gravadas todas as variáveis (por aquisição ou cálculo) do sistema.

¹⁶ Todas as configurações dos itens OPC do SISMOCAR são apresentadas no APÊNDICE C.

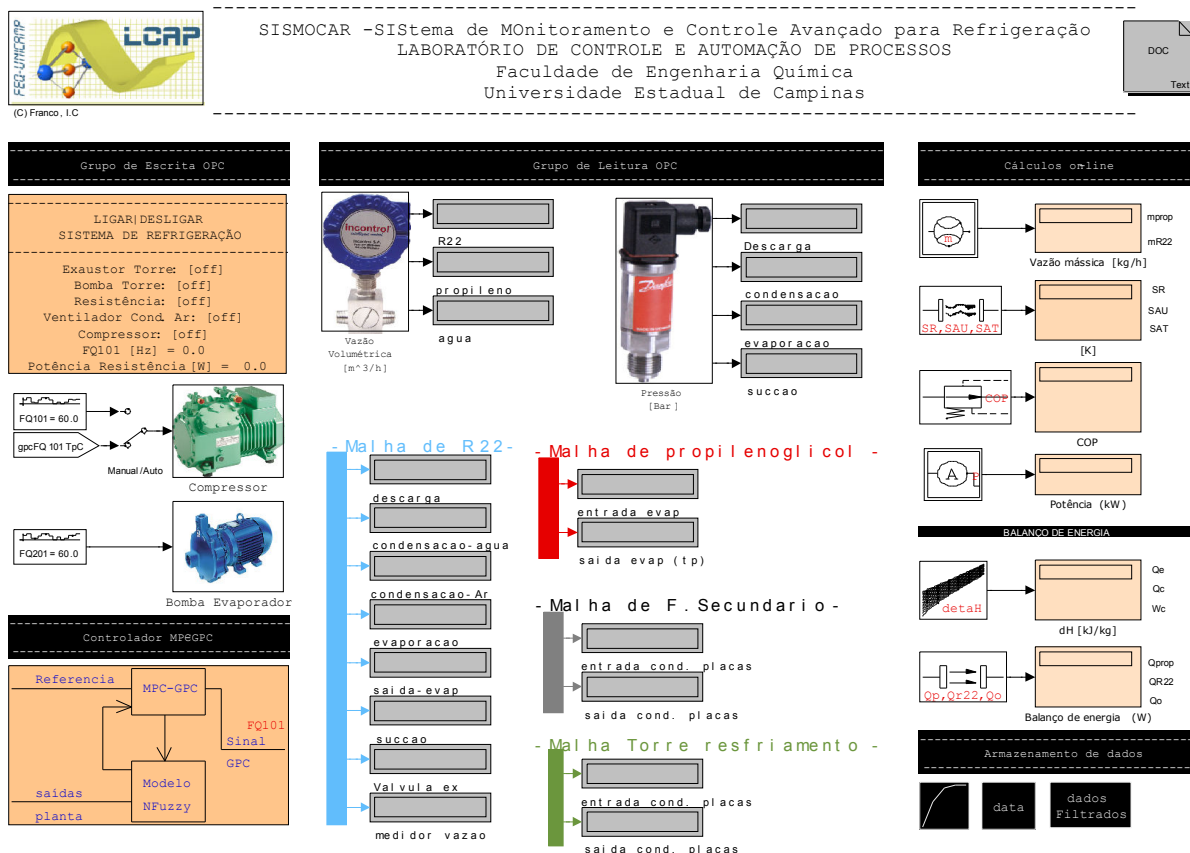


Figura 5. 13 – Tela principal do SISMOCAR (SISTema de MONitoramento e Controle Avançado para Refrigeração)

O *grupo de escrita* destina-se a enviar comandos de acionamento para o compressor, o ventilador do condensador a ar, a bomba do evaporador, a bomba do condensador a água, a bomba da torre de resfriamento, o exaustor da torre de resfriamento e a resistência elétrica.

O *grupo de leitura* é responsável pela leitura e visualização das vazões de R22 e propilenoglicol, pressões e temperaturas da malhas de R22, de propilenoglicol, fluido auxiliar de troca térmica e água da torre de resfriamento. Os dados são filtrados com auxílio de um filtro gaussiano.

O *grupo de cálculos on-line* realiza cálculos importantes no sistema. Os cálculos em tempo real realizados são: vazão mássica de R22 e propilenoglicol; entalpia de condensação e evaporação e trabalho de compressão; subresfriamento e superaquecimento útil e total; calor retirado do propilenoglicol e calor absorvido pelo R22; COP de Carnot e COP real e; potência requerida do compressor. Os cálculos realizados são descritos no APÊNDICE A.

O *monitoramento gráfico* mostrou em tempo real a dinâmica das variáveis de interesse.

O *data save* grava os valores de todas as variáveis monitoradas e calculadas em arquivos com a extensão *.mat* para posterior utilização.

5.4 Dinâmica das variáveis do sistema sob perturbações

Ensaio para a verificação da dinâmica das variáveis do sistemas sob perturbação foram realizados para analisar melhor a influência das perturbações sobre as mesmas. No início, foram realizados ensaios, utilizando o processo de condensação a ar e perturbação apenas na frequência do compressor ($FQ101$), conforme descrito na Tabela 4.7. Posteriormente foram realizados ensaios utilizando o processo de condensação a água e perturbações individuais na frequência do compressor ($FQ101$) e na carga térmica (Q) como apresentado nas Tabelas 4.8 e 4.9. Também é apresentada a dinâmica do sistema, quando no estado estacionário, para as condições padrões dos ensaios no APÊNDICE B.

5.4.1 Processo de condensação a ar (*step* compressor: 50-60-50 Hz)

Os resultados obtidos para o processo de condensação a ar com variação 50-60-50

Hz no compressor são apresentados nas Figuras 5.14 a 5.17. Na Figura 5.14, que representa a dinâmica das temperatura do fluido refrigerante R22 na entrada e na saída do evaporador, observa-se que aumentando a frequência do compressor (a rotação) diminui-se a temperatura do R22 na entrada do evaporador e como consequência a temperatura do R22 na saída do evaporador segue a mesma dinâmica. Isto reflete diretamente na temperatura do propilenoglicol que tem sua temperatura reduzida quando aumenta-se a frequência do compressor, Figura 5.15

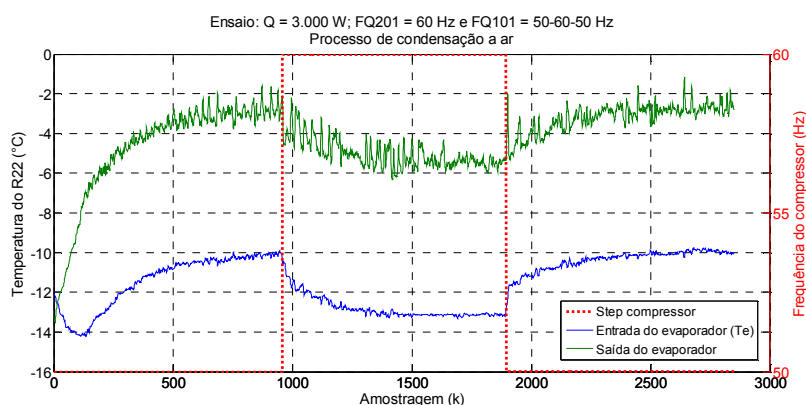


Figura 5. 14 – Dinâmica da temperatura do R22 na entrada (Te) e na saída do evaporador com variação na frequência do compressor (50-60-50 Hz), onde k=10 s.

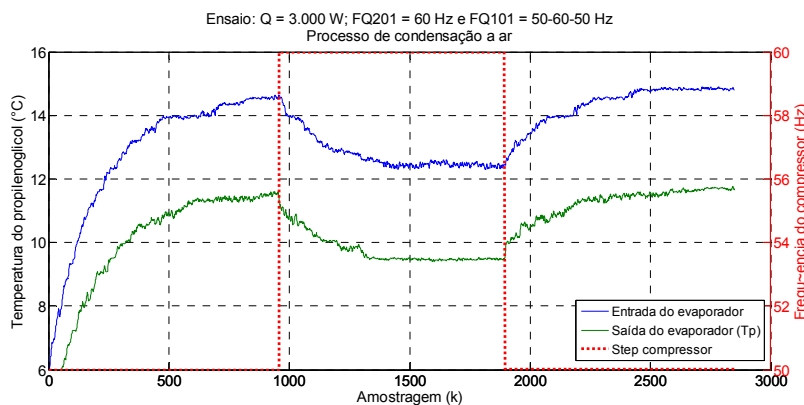


Figura 5. 15 - Dinâmica da temperatura do propilenoglicol na entrada (Tp) e na saída do evaporador com variação na frequência do compressor (50-60-50 Hz), onde k=10 s.

O sistema de refrigeração funciona com uma válvula de expansão termostática da Danfoss com orifício n° 3, que está regulada para atender os valores de superaquecimento útil e total e subresfriamento sugerido pelos Boletins de Engenharia da Bitzer n° 20 e n° 21 (fabricante do compressor utilizado). De acordo com os Boletins de Engenharia da Bitzer os valores recomendados para o superaquecimento útil, SAU , é de 3 a 7 K, para o superaquecimento total, SAT , de 8 a 20 K e para o subresfriamento, SUB , de 3 a 5 K. Valores fora das faixas recomendadas podem ocasionar problemas ao ciclo de refrigeração como:

- ✓ retorno de líquido ao compressor, ocasionado por um superaquecimento total baixo, causando quebra mecânica;
- ✓ altas temperaturas de descarga (que pode carbonizar o óleo do motor do compressor), falta de resfriamento do motor do compressor, e diminuição da capacidade frigorífica e aumento da potência consumida, devido a um superaquecimento total muito alto;
- ✓ perdas de rendimento do sistema frigorífico pela presença indesejável do flash gás (evaporação instantânea do líquido) na linha de líquido.

Verificando o Figura 5.16, observa-se que o ciclo de refrigeração trabalha com os valores de SAU , SAT e SUB dentro do recomendado pelo fabricante do compressor.

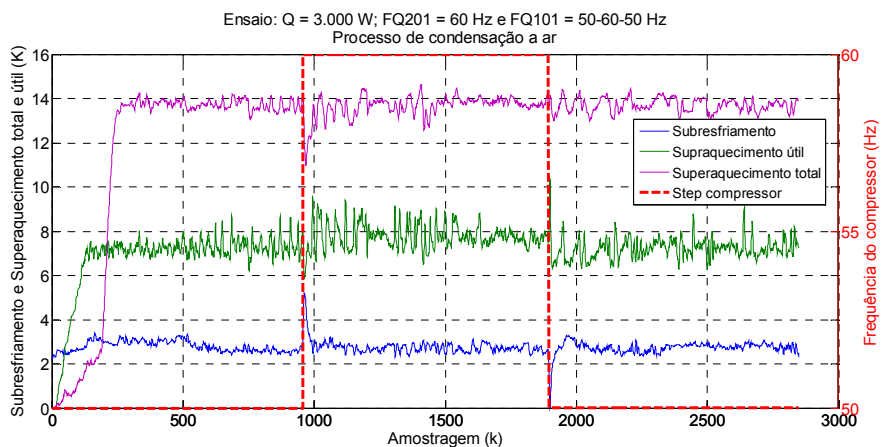


Figura 5. 16 - Dinâmica da temperatura do subresfriamento, do superaquecimento total e útil com variação na frequência do compressor (50-60-50 Hz), onde $k=10$ s.

No sistema foi realizado um balanço de energia, onde os valores de calor retirado do propilenoglicol, Q_p , e calor adicionado ao refrigerante R22, Q_e são calculados “on-line” (APÊNDICE A) e comparados com o calor adicionado a propilenoglicol, Q_o . A Figura 5.17 representa o balanço de energia e nela pode-se verificar um balanço coerente.

Na Tabela 5.5 pode-se observar os estados estacionários obtidos das Figuras 5.13 a 5.17 para variação na frequência do compressor (50-60-50 Hz) utilizando processo de condensação a ar e carga térmica constante em 3000 W.

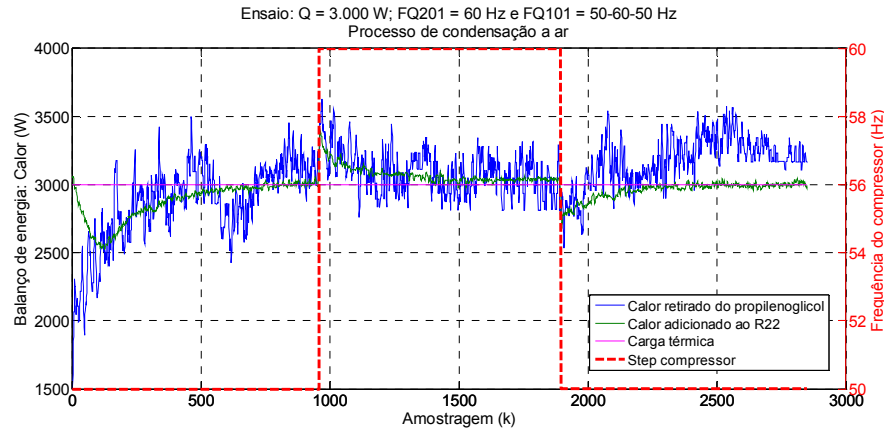


Figura 5. 17 - Dinâmica do calor retirado do propilenoglicol e calor adicionado ao R22 com variação na frequência do compressor (50-60-50 Hz), onde $k=10$ s.

Tabela 5. 5 – Valores dos estados estacionários das variáveis obtidas com a variação na frequência do compressor (50-60-50 Hz)

Variável	Perturbações na frequência do compressor com $Q = 3000$ W		
	FQ101 = 50 Hz	FQ101 = 60 Hz	FQ101 = 50 Hz
T_e [°C]	-10,1	-13,1	-10,0
T_{se} [°C]	-2,8	-5,4	-2,8
T_{pee} [°C]	14,5	12,4	14,8
T_p [°C]	11,4	9,5	11,6
SUB [K]	2,6	2,7	2,8
SAU [K]	7,3	7,7	7,3
SAT [K]	13,6	13,8	13,7
Q_p [W]	3154,1	3058,7	3266,6
Q_e [W]	3003,7	3036,3	2996,2

T_e : temperatura de evaporação; T_{se} : temperatura R22 na saída do evaporador; T_{pee} : temperatura do propilenoglicol na entrada do evaporador; T_p : temperatura do propilenoglicol na saída do evaporador; SUB: subresfriamento; SAU: superaquecimento útil; SAT: superaquecimento total; Q_p : calor retirado do propilenoglicol; Q_e : calor cedido ao R22

Verifica-se na Tabela 5.5 que as variações sofridas pelas variáveis ao se aplicar perturbações não foram muito elevadas, tanto para variação positiva de 10 Hz quanto negativa de 10 Hz. A variável temperatura de evaporação (T_e) apresentou a maior variação à perturbação, em torno de 5 °C. A temperatura do propilenoglicol apresentou

uma variação, tanto na entrada do evaporador (T_{pee}) quanto na saída do evaporador (T_p) de 3 °C aproximadamente. Os valores de SAU , SAT e SUB variaram em torno de 0,1 °C, 2 °C e 1,2 °C respectivamente.

5.4.2 Processo de condensação a ar (*step* compressor 50-70-50 Hz)

As Figuras 5.18 a 5.21 representam os resultados obtidos em função da amostragem k para o processo de condensação a ar com variação 50-70-50 Hz no compressor.

Nas Figuras 5.18 e 5.19 pode-se observar a influência do aumento da frequência do compressor nas temperaturas de evaporação e do propilenoglicol respectivamente. Quando há o aumento da frequência (aumenta a rotação) aumenta-se a vazão volumétrica de fluido refrigerante no compressor e conseqüentemente diminui a temperatura de evaporação aumentando o ΔT do propilenoglicol no evaporador. Os valores de SAU , SAT e SUB se mantêm dentro do recomendado pelo fabricante do compressor (Figura 5.20) assegurando assim a integridade do sistema. Na Figura 5.21 observa-se que a quantidade de calor adicionada ao propilenoglicol é retirado no evaporador, transferindo-se para o fluido refrigerante R22.

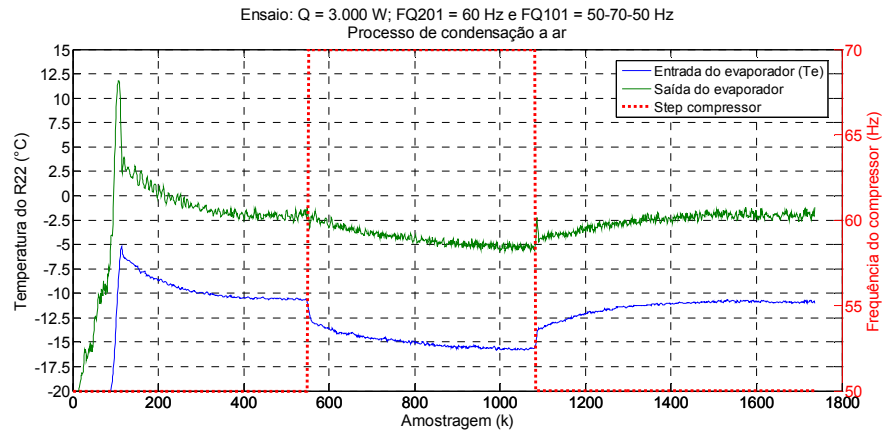


Figura 5. 18 - Dinâmica da temperatura do R22 na entrada (T_e) e na saída do evaporador com variação na frequência do compressor (50-70-50 Hz), onde $k=10$ s.

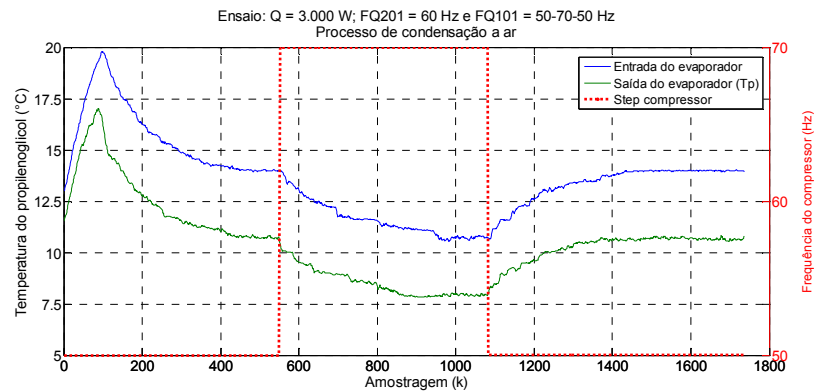


Figura 5. 19 – Dinâmica da temperatura do propilenoglicol na entrada (T_p) e na saída do evaporador com variação na frequência do compressor (50-70-50 Hz), onde $k=10$ s.

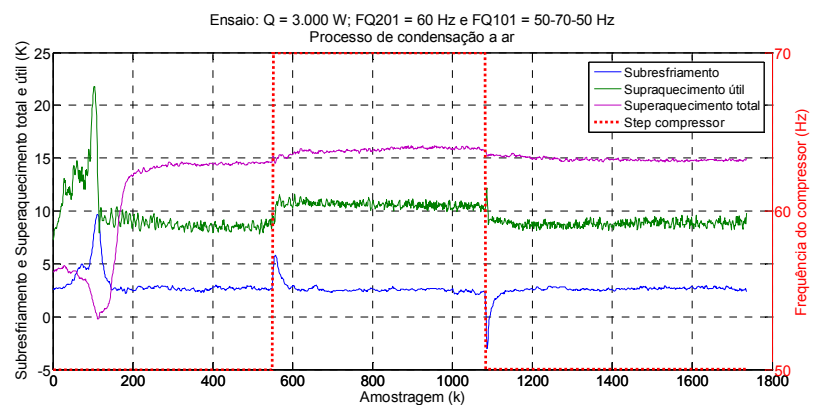


Figura 5. 20 – Dinâmica da temperatura do subresfriamento, do superaquecimento total e útil com variação na frequência do compressor (50-70-50 Hz), onde $k=10$ s.

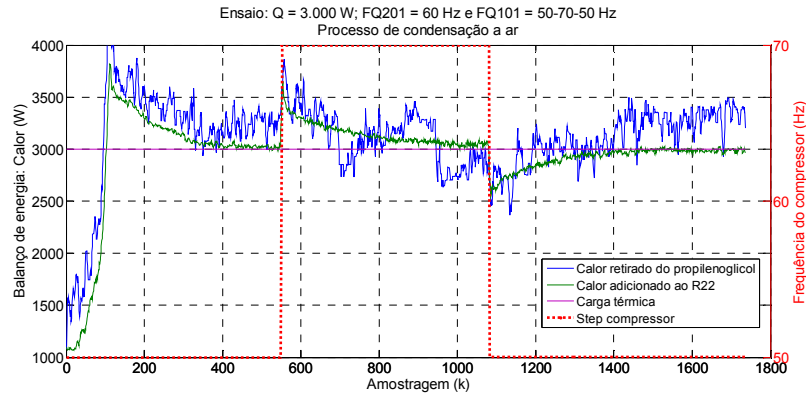


Figura 5. 21 – Dinâmica do calor retirado do propilenoglicol e calor adicionado ao R22 com variação na frequência do compressor (50-70-50 Hz), onde k=10 s

Na Tabela 5.6 pode-se observar os estados estacionários obtidos das Figuras 5.18 a 5.21 para variação na frequência do compressor (50-70-50 Hz) utilizando processo de condensação a ar.

Tabela 5. 6- Valores dos estados estacionários das variáveis obtidas com a variação na frequência do compressor (50-70-50 Hz)

Variável	Perturbações na frequência do compressor Q= 3000 W		
	FQ101 = 50 Hz	FQ101 = 70 Hz	FQ101 = 50 Hz
Te [°C]	-10,4	-15,6	-10,9
Tse [°C]	-1,8	-5,1	-2,0
Tpee [°C]	14,3	10,8	14,0
Tp [°C]	11,1	7,9	10,7
SUB [K]	2,6	2,5	2,7
SAU [K]	8,5	10,5	8,9
SAT [K]	14,4	16,0	14,8
Qp [W]	3215,9	2904,8	3291,7
Qe [W]	3047,8	3054,7	2988,7

Te: temperatura de evaporação; Tse: temperatura R22 na saída do evaporador; Tpee: temperatura do propilenoglicol entrada do evaporador; Tp: temperatura do propilenoglicol na saída do evaporador; SUB: subresfriamento; SAU: superaquecimento útil; SAT: superaquecimento total; Qp: calor retirado do propilenoglicol; Qe: calor cedido ao R22

Pode-se verificar na Tabela 5.6 que, ao se aplicar perturbações positiva e negativa de 20 Hz cada, as variáveis do sistema não apresentaram, como anteriormente, variações muito elevadas. O *SAU*, *SAT* e *SUB* permaneceram praticamente inalterados, apresentando uma variação de aproximadamente 0,2 °C. A temperatura do R22 na entrada do evaporador (*Te*) e na saída do evaporador (*Tse*) apresentou uma variação em torno de 3 °C. A variação na temperatura do propilenoglicol (*Tp* e *Tpee*) manteve-se próximas de 2,5 °C.

5.4.3 Processo de condensação a ar (*step* compressor: 50-40-50 Hz)

Os resultados obtidos para o processo de condensação a ar com variação 50-40-50 Hz no compressor em função da amostragem (k) são apresentados nas Figuras 5.22 a 5.25.

O efeito da variação da frequência do compressor pode ser observado nas temperaturas do R22 na entrada (*Te*) e na saída do evaporador (*Tse*). Quando se diminui a frequência, aumenta-se a temperatura de evaporação. Observa-se esse efeito na Figura 5.22 e consequentemente esse mesmo efeito na temperatura do propilenoglicol, Figura 5.23.

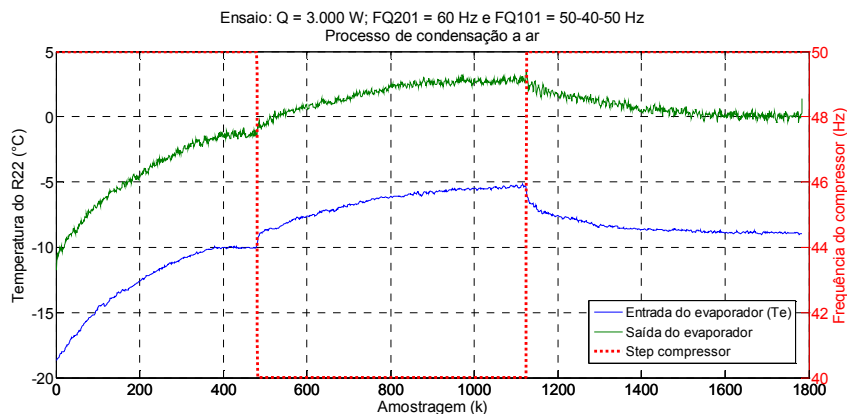


Figura 5. 22 – Dinâmica da temperatura do R22 na entrada (T_e) e na saída do evaporador com variação na frequência do compressor (50-40-50 Hz), onde $k=10$ s.

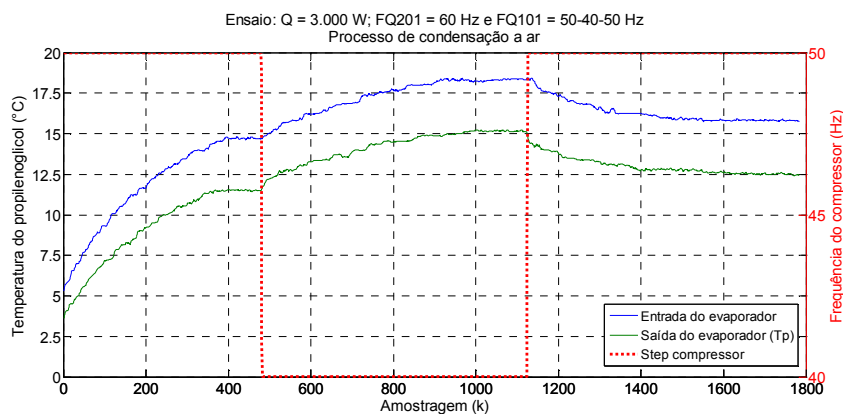


Figura 5. 23 – Dinâmica da temperatura do propilenoglicol na entrada (T_p) e na saída do evaporador com variação na frequência do compressor (50-40-50 Hz), onde $k=10$ s.

Nota-se na Figura 5.24 que o superaquecimento útil (SAU), o superaquecimento total (SAT) e o subresfriamento (SUB), não se alteraram quando o sistema foi submetido a uma perturbação na variação do compressor mantendo-se dentro do recomendado pelo fabricante do compressor. As quantidades de calor adicionado e removido também ficaram próximas (Figura 5.25).

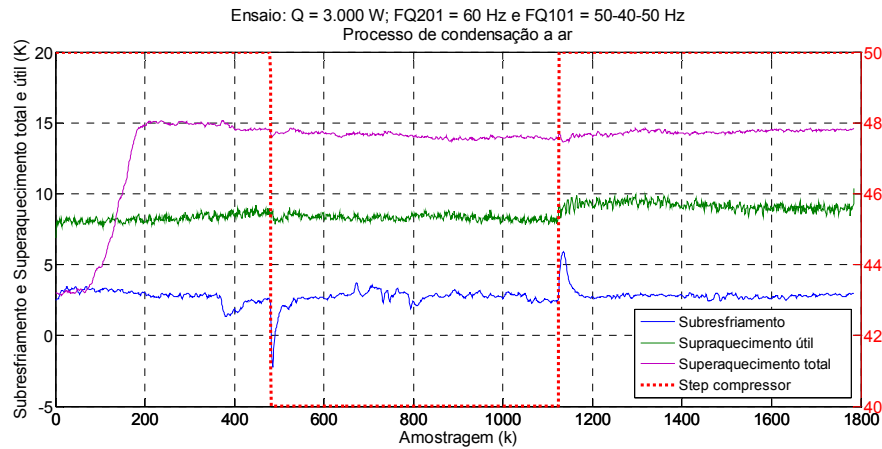


Figura 5. 24 – Dinâmica da temperatura do subresfriamento, do superaquecimento total e útil, com variação na frequência do compressor (50-40-50 Hz), onde $k=10$ s.

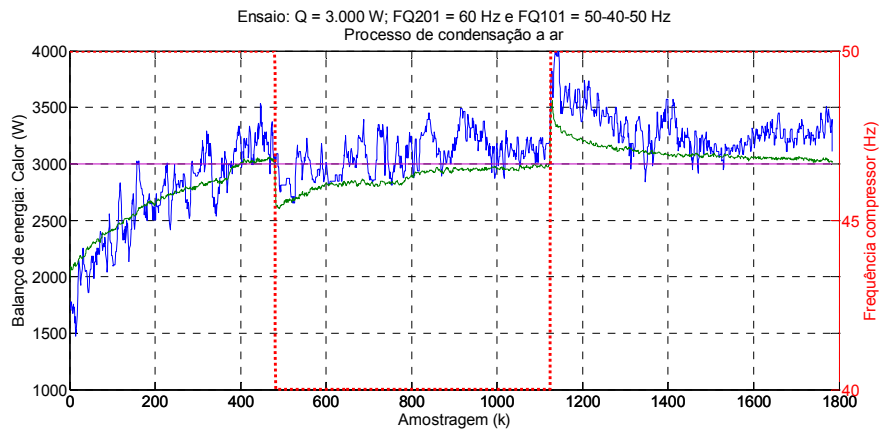


Figura 5. 25 – Dinâmica do calor retirado do propilenoglicol e calor adicionado ao R22 com variação na frequência do compressor (50-70-50 Hz), onde $k=10$ s.

Na Tabela 5.7 pode-se observar os estados estacionários obtidos das Figuras 5.22 a 5.25 para variação na frequência do compressor (50-40-50 Hz), utilizando processo de condensação a ar. A variação mais significativa observada foi na temperatura do fluido refrigerante R22 na entrada e na saída do evaporador, T_e e T_{se} , respectivamente, que ficou próximo a 4,5 °C. O superaquecimento útil e total (SAU e SAT) e subresfriamento (SUB) permaneceram praticamente inalterados com uma variação de 0,1 °C.

Tabela 5. 7 - Valores dos estados estacionários das variáveis obtidas com a variação na frequência do compressor (50-40-50 Hz)

Variável	Perturbações na frequência do compressor Q = 3000 W		
	FQ101 = 50 Hz	FQ101 = 40 Hz	FQ101 = 50 Hz
Te [°C]	-10,0	-5,4	-8,9
Tse [°C]	-1,4	2,8	0,1
Tpee [°C]	14,7	18,3	15,8
Tp [°C]	11,5	15,2	12,5
SUB [K]	2,4	2,6	2,8
SAU [K]	8,6	8,2	8,9
SAT [K]	14,5	14,0	14,5
Qp [W]	3190,4	3120,2	3254,7
Qe [W]	3020,7	2966,7	3046,0

5.4.4 Processo de condensação a água (*step* compressor: 60-70-60 Hz)

Os resultados obtidos para o processo de condensação a água com variação 60-70-60 Hz no compressor, mostrados em função da amostragem (k), são apresentados nas Figuras 5.26 a 5.28.

Nas Figuras 5.26 e 5.27, observa-se a influência da variação na frequência do compressor nas temperaturas do R22 na entrada e na saída do evaporador e do propilenoglicol, tanto na entrada como na saída do evaporador. Com o aumento da frequência, diminui-se as temperaturas. Houve uma variação de aproximadamente 2 °C para a temperatura de evaporação (Te) e uma variação de 1 °C para a temperatura do propilenoglicol (Tp).

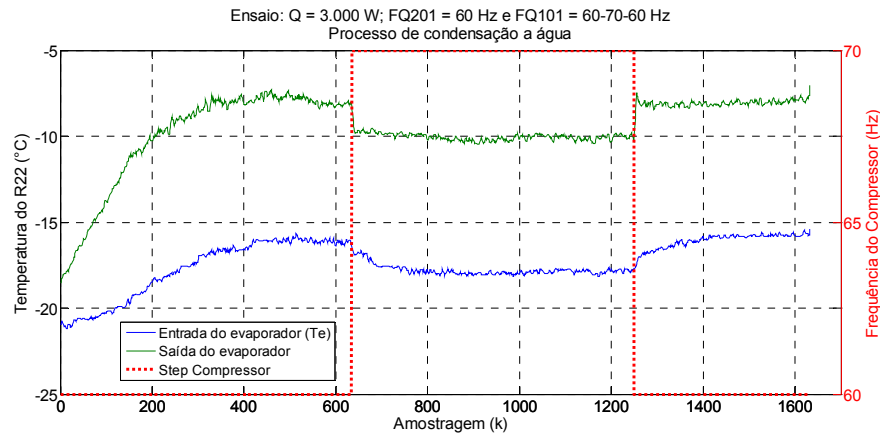


Figura 5. 26 – Dinâmica da temperatura do R22 na entrada (T_e) e na saída do evaporador com variação na frequência do compressor (60-70-60 Hz), onde $k=10$ s.

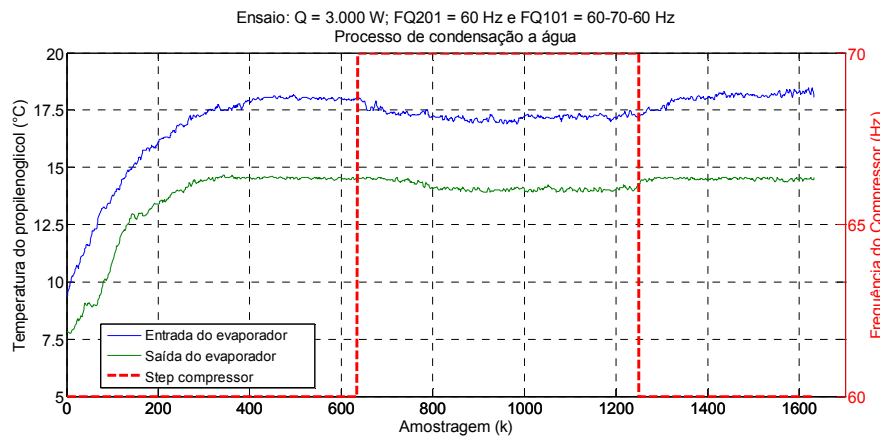


Figura 5. 27 – Dinâmica da temperatura do propilenoglicol na entrada (T_p) e na saída do evaporador com variação na frequência do compressor (60-70-60 Hz), onde $k=10$ s.

Um efeito diferente ao causado na condensação a ar é observado no superaquecimento útil e total e subresfriamento do ciclo de refrigeração (Figura 5.28). Ao contrário do observado anteriormente, o superaquecimento total apresentou uma variação de aproximadamente 3 °C, porém mantendo-se dentro do recomendado (Boletim de Engenharia Bitzer). O superaquecimento útil e o subresfriamento não apresentaram mudanças significativas, 0,1 °C.

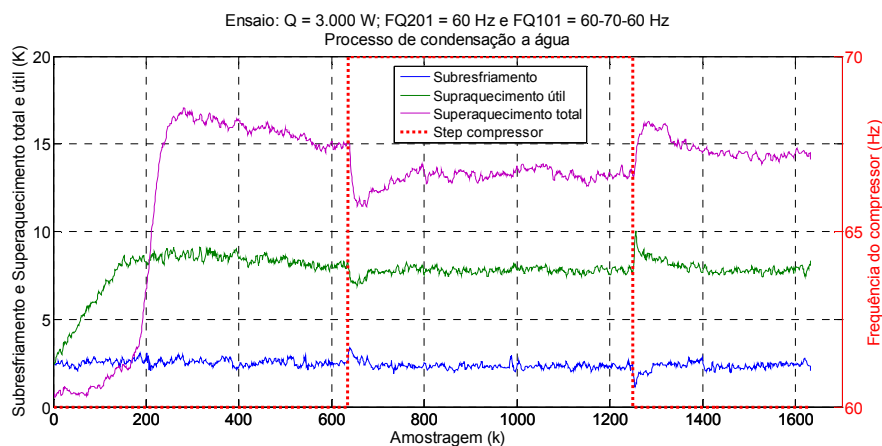


Figura 5. 28 – Dinâmica da temperatura do subresfriamento, do superaquecimento total e útil com variação na frequência do compressor (60-70-60 Hz), onde k=10 s.

5.4.5 Processo de condensação a água (*step* compressor: 60-50-60 Hz)

Os resultados obtidos, em função da amostragem (k), para o processo de condensação a água, com variação 60-50-60 Hz no compressor, são apresentados nas Figuras 5.29 a 5.31.

As temperaturas de evaporação (T_e), (Figura 5.29) e do propilenoglicol (T_p), (Figura 5.31) apresentaram uma variação de 3 °C. Verifica-se também que, ao diminuir a frequência do compressor, aumenta-se a temperatura de evaporação, isto devido ao fato da diminuição da vazão mássica de fluido refrigerante.

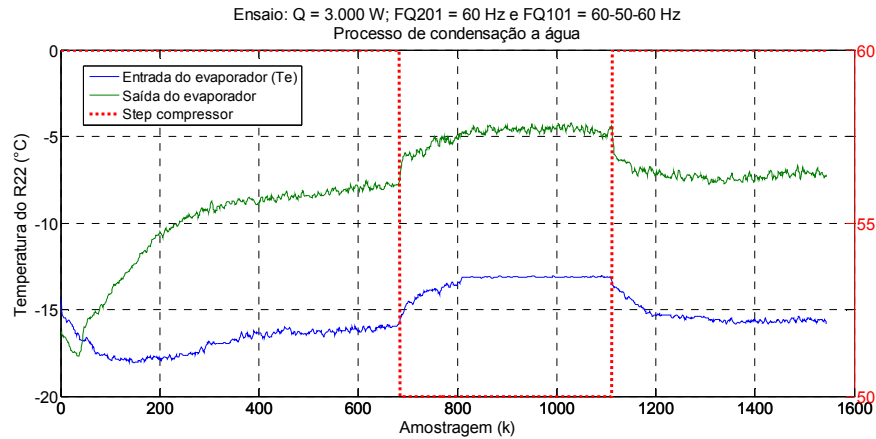


Figura 5. 29 – Dinâmica da temperatura do R22 na entrada (T_e) e na saída do evaporador com variação na frequência do compressor (60-50-60 Hz), onde $k=10$ s.

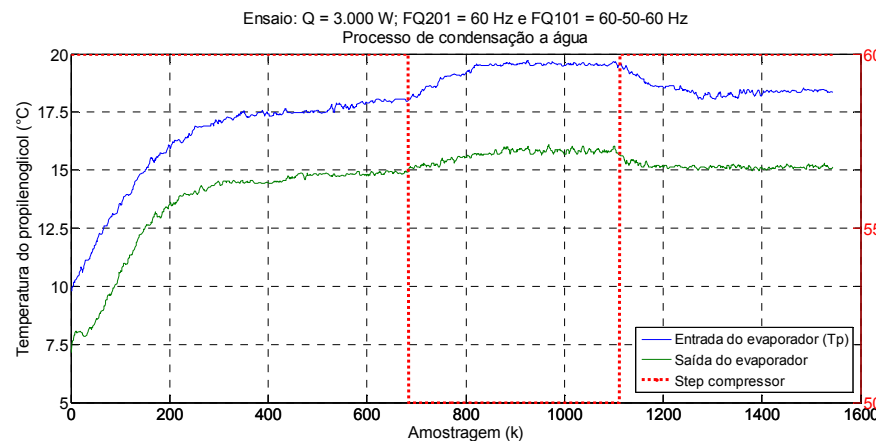


Figura 5. 30 – Dinâmica da temperatura do propilenoglicol na entrada (T_p) e na saída do evaporador com variação na frequência do compressor (60-50-60 Hz), onde $k=10$ s.

Observando a Figura 5.31, nota-se que o superaquecimento útil sofre uma variação de aproximadamente $1,4\text{ }^{\circ}\text{C}$, mantendo-se dentro do recomendado pelo fabricante do compressor e o superaquecimento útil e subresfriamento não apresentam alterações significativas ficando em torno de $0,3\text{ }^{\circ}\text{C}$.

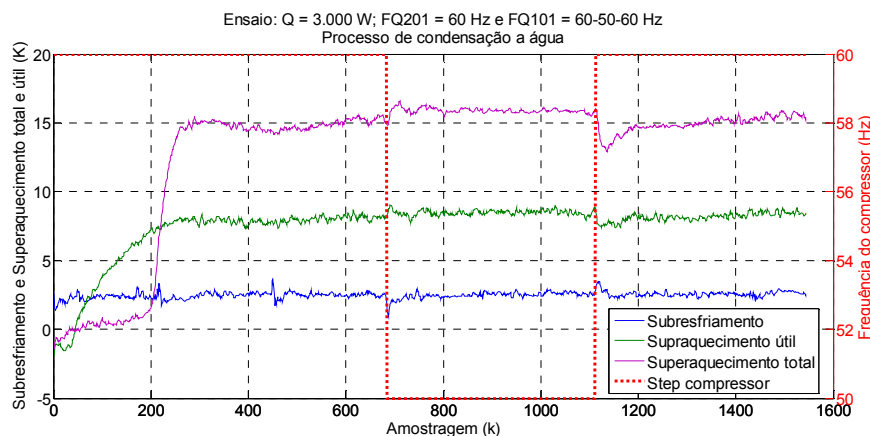


Figura 5. 31 – Dinâmica da temperatura do subresfriamento, do superaquecimento total e útil com variação na frequência do compressor (60-50-60 Hz), onde k=10 s.

5.4.6 Processo de condensação a água (*step* carga térmica: 3000-4000-3000 W)

Além da variação da frequência do compressor, foram realizadas também perturbações na carga térmica adicionada ao propilenoglicol. Os resultados obtidos para o processo de condensação a água com variação 3.000-4.000-3.000 W na resistência são apresentados nas Figuras 5.32 a 5.34. A amostragem (k) de dados foi de 10 s.

A variação da temperatura de evaporação (T_e) apresentou uma significativa mudança de 6,5 °C quando se variou a carga térmica do sistema em 1.000 W; isto pode ser verificado na Figura 5.32. Em consequência obteve-se uma variação de aproximadamente 5 °C na temperatura do propilenoglicol, Figura 5.33.

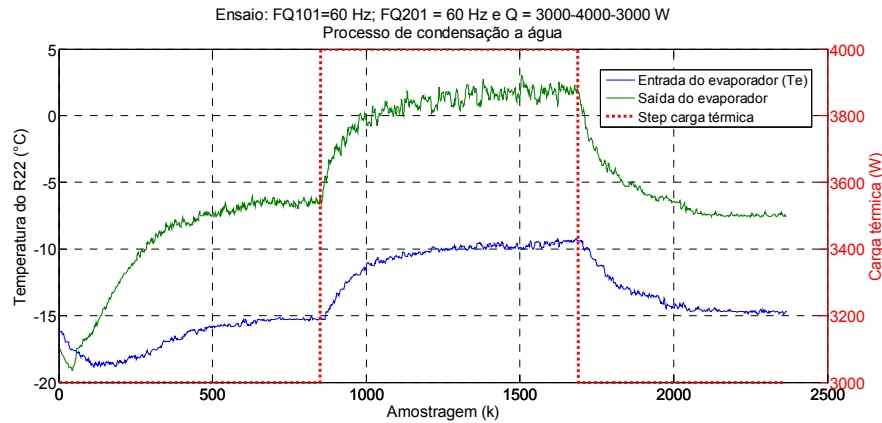


Figura 5. 32 – Dinâmica da temperatura do R22 na entrada (Te) e na saída do evaporador com variação na carga térmica (3000-4000-3000 W), onde $k=10$ s.

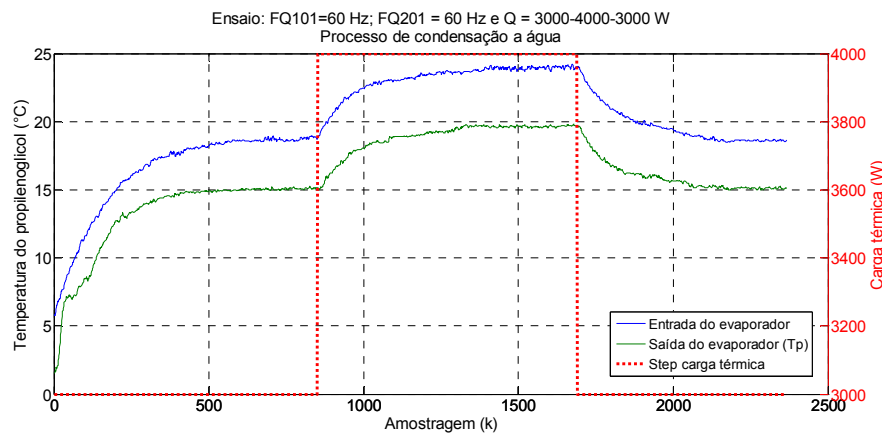


Figura 5. 33 – Dinâmica da temperatura do propilenoglicol na entrada (Tp) e na saída do evaporador com variação na carga térmica (3000-4000-3000 W), onde $k=10$ s.

Verificando a Figura 5.34, nota-se que a o superaquecimento útil, quando da variação da carga térmica de 3.000 W para 4.000 W, ficou acima do recomendado. Isto se deve ao fato da válvula de expansão ajustar o superaquecimento para manter a retirada da carga térmica, de uma certa forma alta, do sistema, visto que o mesmo tem capacidade de um pouco mais de 1 TR (tonelada de refrigeração).

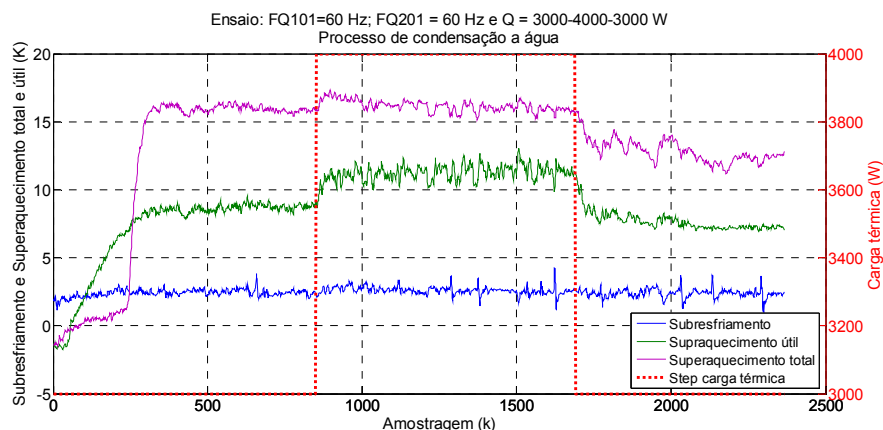


Figura 5. 34 – Dinâmica da temperatura do subresfriamento, do superaquecimento total e útil com variação na carga térmica (3000-4000-3000 W), onde $k=10$ s.

5.4.7 Processo de condensação a água (*step* carga térmica: 3000-2000-3000 W)

Os resultados obtidos para o processo de condensação a água com variação 3000-2000-3000 W no compressor são apresentados nas Figuras 5.35 a 5.37.

A maior variação encontrada na temperatura de evaporação (T_e) e na temperatura do propilenoglicol foi quando diminui-se a carga térmica para 2.000 W. Isto se deve ao fato de que quanto menos carga térmica para se retirar do sistema menos calor para se transferir ao fluido refrigerante R22. Na Figura 5.35, nota-se a variação em torno de 4 °C na temperatura de evaporação e 10 °C na temperatura do R22 na saída do evaporador e, na Figura 5.36, uma variação de 9 °C na temperatura do propilenoglicol (T_p).

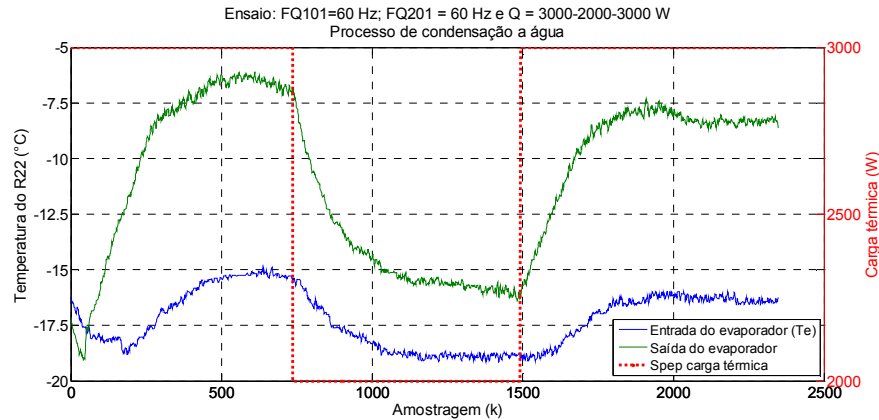


Figura 5. 35 – Dinâmica da temperatura do R22 na entrada (Te) e na saída do evaporador com variação na carga térmica (3000-2000-3000 W), onde k=10 s.

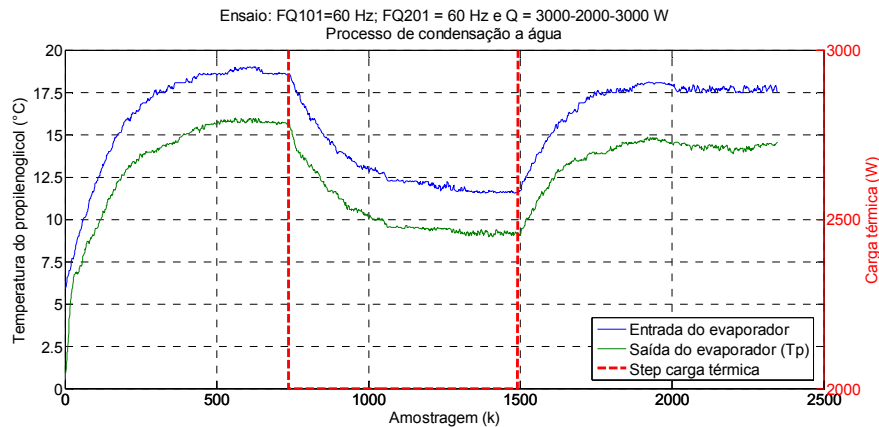


Figura 5. 36 - Dinâmica da temperatura do propilenoglicol na entrada (Tp) e na saída do evaporador com variação na carga térmica (3000-2000-3000 W), onde k=10 s.

A baixa carga térmica fez com que o superaquecimento total do sistema variasse em 16 °C atingindo o mínimo de 1 °C, considerado um superaquecimento muito baixo. O superaquecimento útil também teve uma variação significativa de 6 °C. Isto se deve a atuação da válvula de expansão termostática atuando no sistema (Figura 5.37).

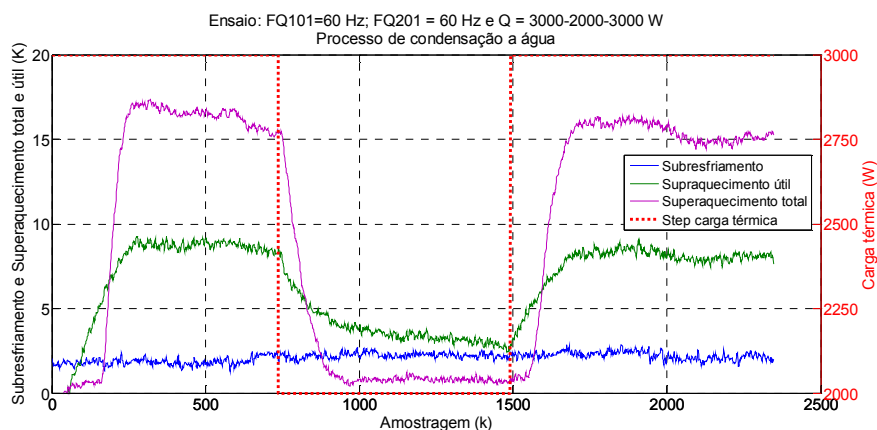


Figura 5. 37 - Dinâmica da temperatura do subresfriamento, do superaquecimento total e útil com variação na carga térmica (3000-2000-3000 W)

5.4.8 Processo de condensação a água (*step* bomba do evaporador: 50-60-50 Hz)

A fim de verificar a influência da variação da vazão mássica de propilenoglicol no evaporador realizou-se ensaios aplicando perturbações na frequência da bomba do evaporador. Os resultados obtidos para os ensaios utilizando condensação a água com perturbações de 50-60-50 Hz na bomba do evaporador são apresentados nas Figuras 5.38 e 5.39.

Na Figura 5.38, pode-se observar que o processo de evaporação, ao sofrer as perturbações, sofre uma variação na temperatura do R22 na entrada (T_e) e na saída do evaporador porém, ao atingir o estado estacionário novamente, as temperaturas sempre retornam ao estado inicial.

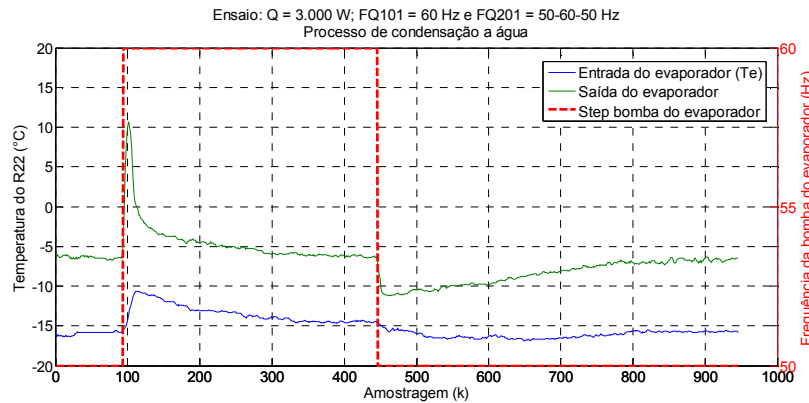


Figura 5. 38 – Dinâmica da temperatura do R22 na entrada (Te) e na saída do evaporador com variação na frequência da bomba do evaporador (50-60-50 Hz), onde $k=10$ s.

Isto se deve ao fato de que as temperaturas do R22 na entrada e na saída do evaporador dependem muito mais da massa deslocada de R22 do que da massa deslocada de propilenoglicol. Como a massa deslocada de R22 se manteve constante (a frequência do compressor se manteve em 60 Hz), a tendência é que atinja as temperaturas do estado inicial.

Já as temperaturas do propilenoglicol na entrada e na saída (Tp) do evaporador apresentam uma variação de aproximadamente 4°C ao se aplicar uma variação de 10 Hz tanto acima como abaixo da frequência padrão de 50 Hz (Figura 5.39).

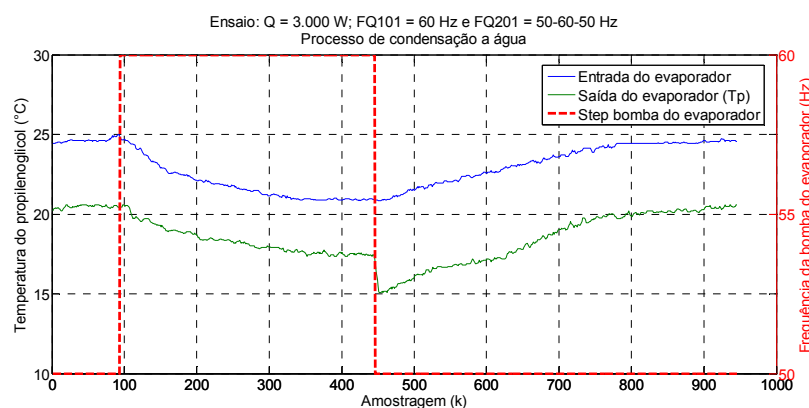


Figura 5. 39 – Dinâmica da temperatura do propilenoglicol na entrada e na saída do evaporador com variação na frequência da bomba do evaporador (50-60-50 Hz), onde $k=10$ s.

5.4.9 Processo de condensação a água (degrau 50-70-50 Hz)

As Figuras 5.40 e 5.41 representam as dinâmicas das temperaturas do R22 na entrada e na saída do evaporador (T_e) e as temperaturas do propilenoglicol na entrada e na saída do evaporador, respectivamente, quando aplicado uma variação na bomba do evaporador de 20 Hz acima da frequência de referência de 50 Hz. Na Figura 5.30, pode-se observar que, assim como na variação de 50-60-50 Hz, na bomba do evaporador obteve-se o mesmo efeito na temperatura do R22 tanto na entrada quanto na saída do evaporador.

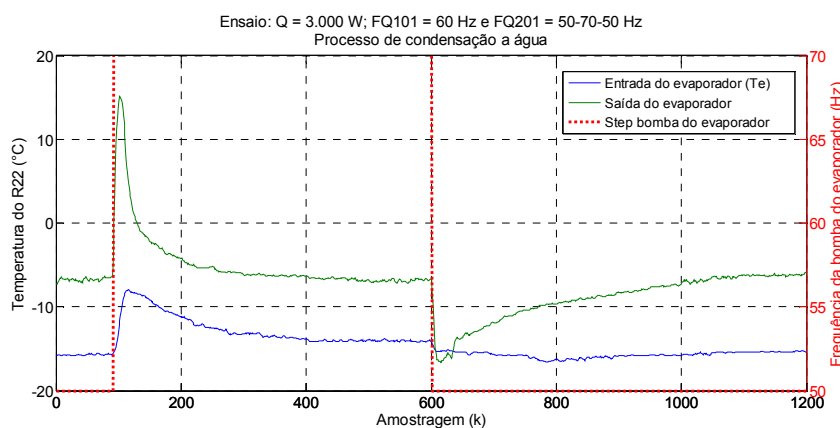


Figura 5. 40 – Dinâmica da temperatura do R22 na entrada (T_e) e na saída do evaporador com variação na frequência da bomba do evaporador (50-70-50 Hz), onde $k=10$ s.

Analisando a figura 5.41, observa-se que a variação na bomba do evaporador acarreta em uma variação de aproximadamente 4 °C na temperatura do propilenoglicol na entrada e na saída (T_p) do evaporador.

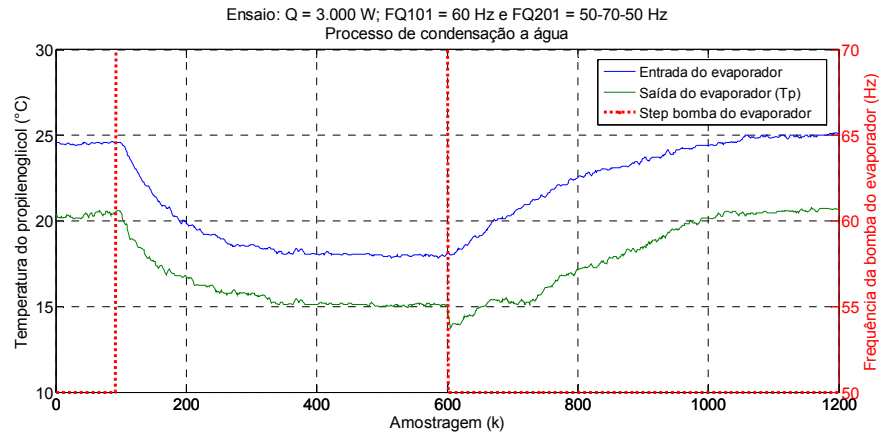


Figura 5. 41 - Dinâmica da temperatura do propilenoglicol na entrada e na saída (T_p) do evaporador com variação na frequência da bomba do evaporador (50-70-50 Hz), onde $k=10$ s.

5.4.10 Processo de condensação a água (*step* bomba do evaporador: 50-40-50 Hz)

Os resultados obtidos para o processo de condensação a água quando submetido o sistemas a perturbações de 50-40-50 Hz na bomba do evaporador são apresentados nas Figuras 5.42 e 5.43.

Na Figura 5.42, observa-se que a comportamento das temperaturas do R22 na entrada (T_e) e na saída do evaporador manteve-se inalterados após atingirem os estados estacionários correspondente a cada frequência da bomba do evaporador. Este efeito ocorreu em todos os ensaios em que o processo de evaporação do ciclo de refrigeração foi submetido a uma perturbação na bomba do evaporador. As temperaturas do propilenoglicol na entrada e na saída (T_p) do evaporador apresentaram uma variação idêntica aos ensaios anteriores para perturbações na bomba do evaporador, ou seja, aproximadamente 4 °C, Figura 5.43.

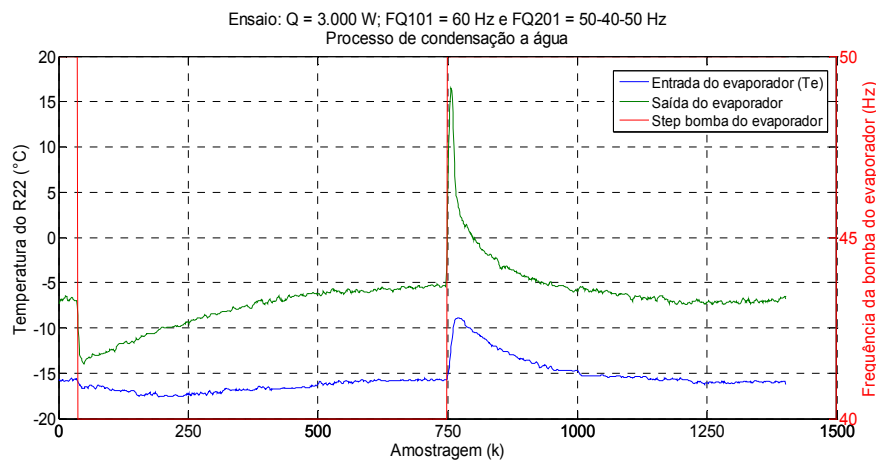


Figura 5. 42 – Dinâmica da temperatura do R22 na entrada (T_e) e na saída do evaporador com variação na frequência da bomba do evaporador (50-40-50 Hz), onde $k=10$ s.

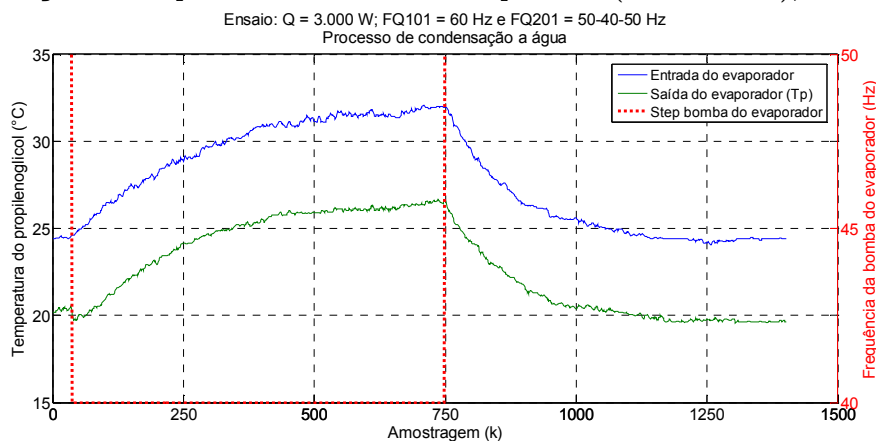


Figura 5. 43 – Dinâmica da temperatura do propilenoglicol na entrada e na saída (T_p) do evaporador com variação na frequência da bomba do evaporador (50-40-50 Hz), onde $k=10$ s.

5.4.11 Análise da não-linearidade do sistema de refrigeração

A partir da análise realizada da dinâmica do sistema de refrigeração observou-se que o sistema apresenta uma não-linearidade. Na Tabela 5.8 pode-se observar os ganhos para as temperaturas de evaporação (T_e) e do propilenoglicol (T_p) quando aplicada uma variação na frequência do compressor para o processo de condensação a ar e uma

variação na frequência do compressor na carga térmica para o processo de condensação a água.

Tabela 5. 8 – Ganhos para os processos de condensação a ar e água do sistema de refrigeração

Processo de condensação a ar			
Variável	Step	Ganhos	Figura
Te	50-60 Hz	-0,29 °C/Hz	Fig. 5.14
	50-40 Hz	0,46 °C/Hz	Fig. 5.22
Tp	50-60 Hz	-0,20 °C/Hz	Fig. 5.15
	50-40 Hz	0,37 °C/Hz	Fig. 5.23
Processo de condensação a água			
Variável	Step	Ganhos	Figura
Te	60-70 Hz	-0,19 °C/Hz	Fig. 5.26
	60-50 Hz	0,30 °C/Hz	Fig. 5.29
	3000-4000 W	0,0056 °C/W	Fig. 5.32
	3000-2000 W	-0,0037 °C/W	Fig. 5.35
Tp	60-70 Hz	-0,05 °C/Hz	Fig. 5.27
	60-50 Hz	0,09 °C/Hz	Fig. 5.30
	3000-4000 W	0,0045 °C/W	Fig. 5.33
	3000-2000 W	-0,0065 °C/W	Fig. 5.36

Te: temperatura de evaporação; Tp: temperatura do propilenoglicol

Observando-se a Tabela 5.8 nota-se que o sistema apresenta uma não-linearidade, pois, os ganhos para uma variação positiva é diferente de quando se aplica a mesma variação, porém, negativa. Como exemplo pode-se analisar a variável *Te* (temperatura de evaporação) quando submetido o compressor a uma variação de 10 Hz acima da frequência padrão de 50 Hz e 10 Hz abaixo da frequência padrão para o processo de condensação a água. Para a variação de 60-70 Hz no compressor tem-se um ganho, em valor absoluto, de 0,19 °C/Hz o que para a variação de 60-50 Hz este ganho, em valor absoluto, é de 0,30 °C/Hz. Isto é observado para todas as variação a qual foi submetida o sistema de refrigeração.

5.5 Modelagem utilizando arquitetura ANFIS

Como descrito no Tópico 4.2.2.2, foram realizadas duas identificações para o sistema de refrigeração (uma identificação para o sistema contendo um compressor aberto e uma identificação para o sistema contendo um compressor semi-hermético), ressaltando que se tratam de identificação completamente diferentes. O método do agrupamento subtrativo (*subtractive clustering*) foi utilizado para a desenvolvimentos dos modelos TS para a predição das temperaturas de evaporação (T_e) e do propilenoglicol (T_p) para ambas as identificações descritas na seção 4.2.3.3.

5.5.1 Agrupamento subtrativo (*Subtractive Clustering*)

Quando se desenvolve modelos a partir de identificação de sistemas é importante que se tenha conhecimento de como se organizar e categorizar os dados além de compreendê-los. Uma forma de se realizar esta compreensão é através de algoritmos de agrupamento, (JANG, 1993). Dentre os algoritmos de agrupamento está o agrupamento subtrativo (*subtractive clustering*).

O agrupamento subtrativo apresenta uma vantagem em relação ao esforço computacional para seu desenvolvimento, pois a mesma é proporcional a quantidade de dados do conjunto de treinamento (PAIVA; DOURADO, 2004).

O agrupamento subtrativo calcula a densidade dos dados em determinado ponto central do agrupamento, ou seja, considerando um conjunto de n pontos $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, onde cada ponto é um possível centro do agrupamento a densidade no ponto x_i , D_i , pode ser representada pela equação 5.1 (LIMA, 2010).

$$D_i = \sum_{j=1}^n \exp\left(-\frac{\|x_i - x_j\|^2}{(r_a/2)^2}\right) \quad \text{Eq. 5.1}$$

Onde r_a (raio) é uma constante positiva que define a vizinhança. Um determinado ponto terá uma alta densidade apresentar muitos pontos em sua vizinhança. Pontos fora do raio r_a contribuem pouco para a medida da densidade.

Após o cálculo da medida da densidade de cada ponto, o primeiro centro do agrupamento é selecionado em função da mais alta medida de densidade. Sendo um ponto selecionado x_{c1} e sua medida de densidade D_{c1} , a medida para cada ponto x_i será expressa pela equação 5.2:

$$D_i = D_i - D_{c1} \exp\left(-\frac{\|x_i - x_{c1}\|^2}{(r_b/2)^2}\right) \quad \text{Eq. 5.2}$$

Onde r_b é uma constante positiva que define a vizinhança que possui diminuição, representativas, em sua densidade de medida fazendo com que esses pontos sejam, provavelmente, descartados como próximos centros de agrupamento. Normalmente a constante r_b é maior que a r_a para evitar agrupamentos com espaços reduzidos. Tipicamente se utiliza $r_b = 1,5 r_a$ (PAIVA; DOURADO, 2004).

Uma vez revisada a densidade de medida, um novo centro de agrupamento x_{c2} é selecionado e todas as densidades de medidas dos conjunto de pontos são revisadas novamente. Este procedimento é realizado até que um número suficiente de agrupamentos que representem o conjunto de dados seja gerado.

Ao se utilizar o método de agrupamento subtrativo em relação aos dados de entrada e saída de um sistema, cada agrupamento resultante apresenta uma “certa” característica do sistema modelado. Assim, o centro de cada agrupamento será utilizado como centro das regras do modelo TS (LIMA, 2010). O agrupamento c_i de dimensão M pode ser decomposto em dois vetores p_i e q_i , sendo p_i a parte de entrada contendo os primeiros N elementos de c_i e q_i é a parte de saída que contém os últimos $M-N$ elementos de c_i . Logo, dado um vetor de entrada x , o grau de pertinência para o qual a regra *Fuzzy RFi* é completada, pode ser definido pela equação 5.3:

$$\mu_i = \exp\left(-\frac{\|x-p_i\|^2}{(r_{a/2})^2}\right) \quad \text{Eq. 5.3}$$

5.5.2 Modelos Takagi-Sugeno I (Sistema de refrigeração utilizando compressor aberto)

Na primeira identificação foram determinados três modelos de predição: um Modelo TS para a temperatura de condensação; um modelo TS para a temperatura de evaporação e um modelo Ts para a temperatura do propilenoglicol. As variáveis de entrada utilizadas na determinação dos modelos estão descritas na Tabela 4.10. Para o treinamento ANFIS foram realizados ensaios, nos quais, a dinâmica do processo do sistema de refrigeração foi determinada como descrito na seção 5.5.2.1.

5.5.2.1 Dados para identificação dos modelos de predição da temperatura de condensação, da temperatura de evaporação e da temperatura do propilenoglicol

Ensaio I: Realizou-se um ensaio variando-se a frequência do compressor do sistema de refrigeração de 30Hz a 70Hz com incremento de 10Hz, mantendo-se a frequência da bomba do evaporador fixa em 40Hz. Para cada perturbação atingiu-se o estado estacionário. Ao atingir o estado estacionário na frequência de 70Hz (limite máximo de variação), variou-se novamente a rotação do compressor de 70Hz a 30Hz com perturbações negativas de 10Hz, mantendo a frequência da bomba de evaporação fixa em 40Hz, atingindo-se o estado estacionário para cada perturbação.

Ensaio II: Realizou-se um ensaio variando-se a frequência da bomba de evaporação de 20Hz a 70Hz, com incrementos de 10Hz, mantendo-se a frequência do compressor fixa em 50Hz. Para cada perturbação atingiu-se o estado estacionário. Ao atingir o estado estacionário na frequência de 70Hz (limite máximo de variação) variou-se novamente a rotação da bomba de evaporação de 70Hz a 20Hz com perturbações negativas de 10Hz, atingindo-se o estado estacionário para cada perturbação.

Os resultados obtidos nos ensaios I e II são apresentados nas Figuras 5.44

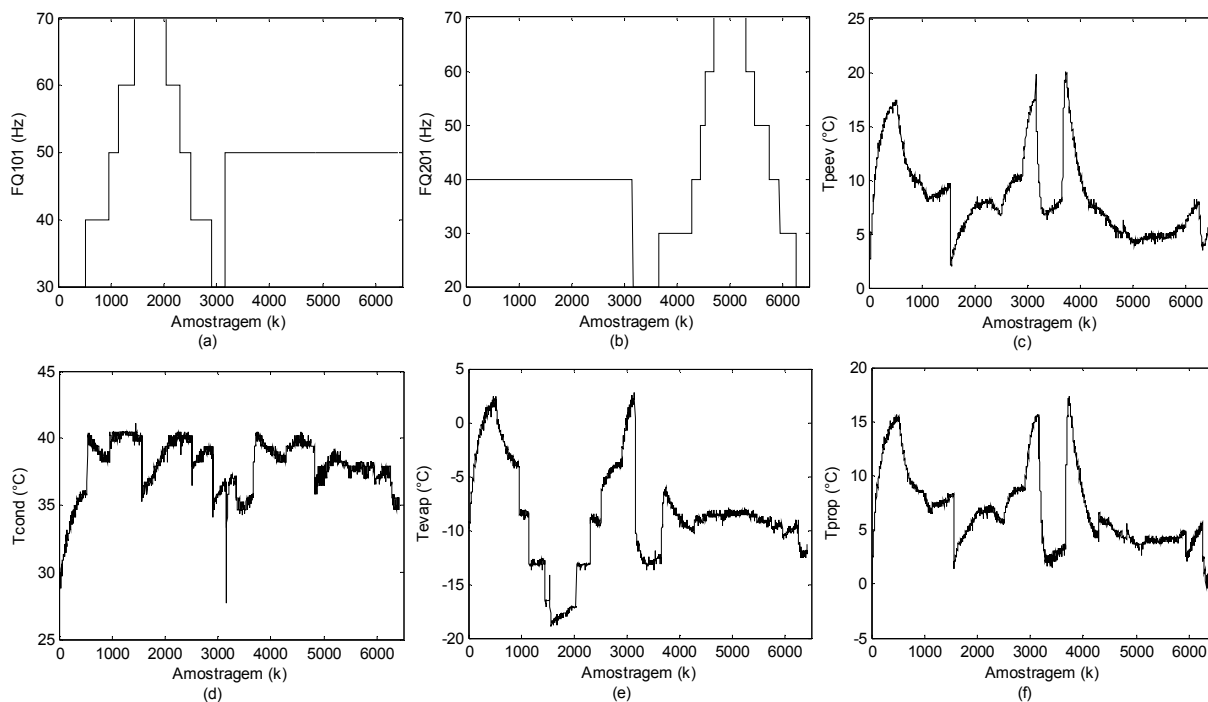


Figura 5. 44 – Dados de treinamento utilizado no desenvolvimento dos Modelos Takagi-Sugeno: a) Frequência do compressor; b) frequência da bomba do evaporador; c) temperatura do propilenoglicol na entrada do evaporador; d) temperatura de condensação; e) temperatura de evaporação e e) temperatura do propilenoglicol.

5.5.2.2 Treinamento ANFIS para determinação dos Modelos Takagi-Sugeno

Para o treinamento ANFIS referente ao modelo Takagi-Sugeno da temperatura de condensação, agrupou-se os dados dos ensaios I e II, citados anteriormente, obtendo uma dinâmica da temperatura de condensação, onde as variações do compressor e da bomba de evaporação estão presentes. Analogamente, seguiu-se o mesmo procedimento para os modelos da temperatura de evaporação e do propilenoglicol.

Para o desenvolvimento dos modelos foram utilizadas as seguintes variáveis linguística: “*LL para Low-Low*”, “*LM para Low-Medium*”, “*LH para Low-High*”, “*HL para High-Low*”, “*HM para High-Medium*” e “*HH para High-High*”.

O modelo *fuzzy* para a temperatura de condensação, T_{cond} , é composto por quatro entradas ($FQ101$, $FQ201$, T_{peev} e $T_{cond(k-1)}$) e seis funções de pertinência para cada entrada. O modelo da temperatura de evaporação, T_{evap} , é composto por quatro entradas ($FQ101$, $FQ201$, T_{peev} e $T_{evap(k-1)}$) e seis funções de pertinência para cada entrada. O modelo da temperatura do *propilenoglicol*, T_{prop} , é composto por quatro entradas ($FQ101$, $FQ201$, T_{peev} e $T_{prop(k-1)}$) e seis funções de pertinência para cada entrada.

As funções de pertinência e, consequentemente o conjunto *Fuzzy* correspondente ao modelo *Fuzzy* da temperatura de condensação, de evaporação e do propilenoglicol, são ilustrados pela Figura 5.45, sendo todos os conjuntos descritos em $\mathcal{R} \rightarrow [0,1]$. Os antecedentes das regras *Fuzzy* são apresentados na Tabela 5.9.

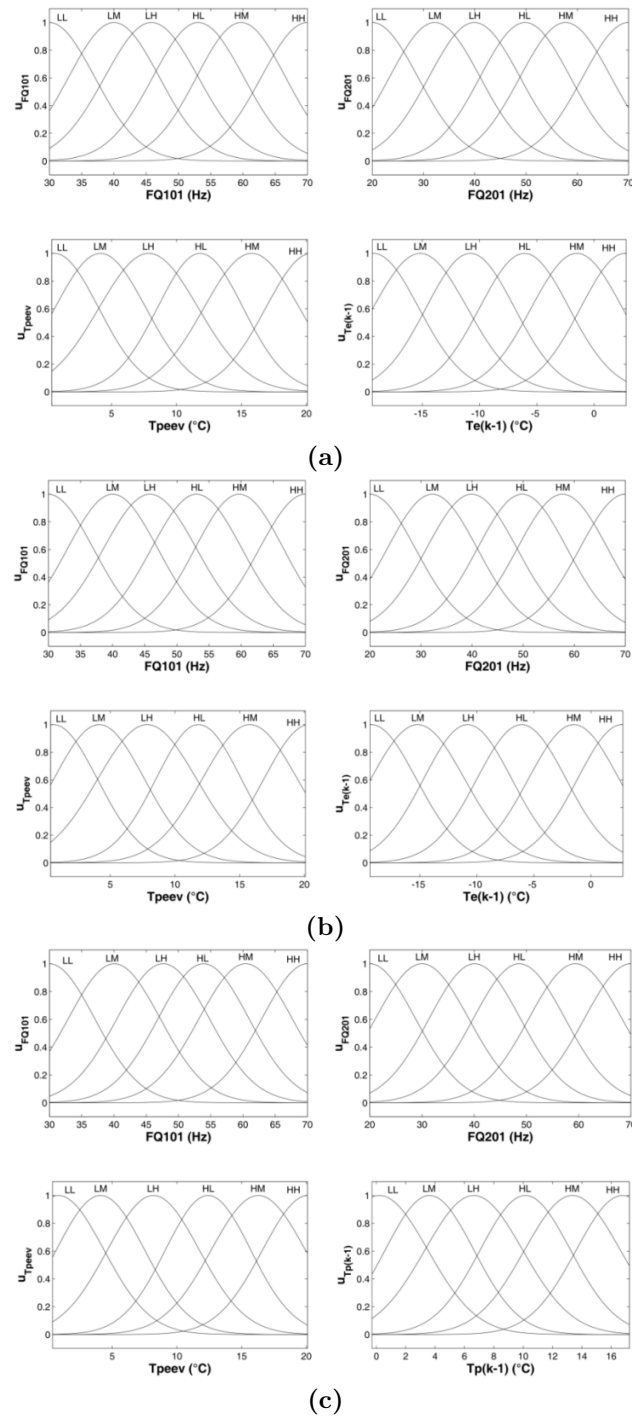


Figura 5. 45 - Conjunto Fuzzy e funções de pertinência do modelo Takagi-Sugeno a) da Temperatura de condensação, Tcond, b) da temperatura de evaporação, Tevap, e c) da temperatura do propilenoglicol, Tprop

Tabela 5. 9 – Antecedentes das regras fuzzy para os modelos Takagi-Sugeno de predição das temperaturas: de condensação; de evaporação e do propilenoglicol

Para modelo da temperatura de condensação, Tcond				
$FQ101$	$FQ201$	T_{peev}	$T_{cond_{k-1}}$	T_{cond}
HL	LH	HL	HL	T_{cond_1}
LH	HH	LL	LH	T_{cond_2}
HM	LL	LM	LM	T_{cond_3}
LL	LM	HH	LL	T_{cond_4}
HH	HL	LH	HM	T_{cond_5}
LM	HM	HM	HH	T_{cond_6}
Para o modelo da temperatura de evaporação, Tevap				
$FQ101$	$FQ201$	T_{peev}	$T_{evap_{k-1}}$	T_{evap}
LH	LH	LH	LH	T_{evap_1}
HL	HH	LL	HL	T_{evap_2}
LM	LM	HM	HM	T_{evap_3}
HM	LL	HL	LM	T_{evap_4}
HH	HL	LM	LL	T_{evap_5}
LL	HM	HH	HH	T_{evap_6}
Para o modelo da temperatura do propilenoglicol, Tprop				
$FQ101$	$FQ201$	T_{peev}	$T_{prop_{k-1}}$	T_{prop}
LH	LH	HL	LH	T_{prop_1}
HL	HH	LL	LM	T_{prop_2}
HM	LL	LH	LL	T_{prop_3}
LM	LM	HM	HL	T_{prop_4}
LL	HL	HH	HH	T_{prop_5}
HH	HM	LM	HM	T_{prop_6}

Obteve-se com o treinamento ANFIS os consequentes para os modelos *Fuzzy* das temperaturas em estudo descritos na Tabela 5.10, onde: q_{ij} são os parâmetros do modelo *fuzzy*.

Tabela 5. 10 – Consequentes das regras fuzzy para os modelos Takagi-Sugeno de predição das temperaturas: de condensação; de evaporação e do propilenoglicol

Modelo fuzzy para a temperatura de condensação, T_{cond}					
T_{cond}	q_{i0}	q_{i1}	q_{i2}	q_{i3}	q_{i4}
Tcond ₁	0.00241	0.00355	0.00686	0.9677	0.936
Tcond ₂	0.01974	-0.00284	-0.02087	0.9670	0.542
Tcond ₃	0.08387	0.03562	-0.01611	0.8705	-0.268
Tcond ₄	-0.78470	-0.74240	0.07710	0.8315	57.760
Tcond ₅	-0.01241	-0.02293	0.14050	0.7958	8.672
Tcond ₆	0.16260	-0.01986	0.06675	0.5487	11.260
Modelo fuzzy para a temperatura de evaporação, T_{evap}					
T_{evap}	q_{i0}	q_{i1}	q_{i2}	q_{i3}	q_{i4}
Tevap ₁	-0.00887	-0.00330	0.03935	0.9450	-0.204
Tevap ₂	-0.33910	0.01610	-0.03925	0.6374	12.930
Tevap ₃	0.00561	0.01635	-0.00202	0.9722	-0.906
Tevap ₄	0.04592	-0.05165	0.04465	0.9016	-2.960
Tevap ₅	-0.03685	5.61200	0.01489	0.9314	-223.200
Tevap ₆	0.16050	0.22200	0.32230	0.3824	-17.780
Modelo fuzzy para a temperatura do propilenoglicol, T_{prop}					
T_{prop}	q_{i0}	q_{i1}	q_{i2}	q_{i3}	q_{i4}
Tprop ₁	-0.00741	0.01435	0.21100	0.7455	-0.194
Tprop ₂	0.04882	-0.00242	0.34260	0.6507	-2.444
Tprop ₃	0.01649	0.02552	0.20530	0.6902	-2.018
Tprop ₄	0.00636	0.01027	0.01952	0.9715	-0.564
Tprop ₅	-0.04477	-0.15500	0.40750	0.5141	7.997
Tprop ₆	-0.57320	-3.30100	0.55280	0.3054	172.900

A representação explícita das regras fuzzy do modelo Takagi-Sugeno, com base nas Tabelas 5.9 e 5.10, encontra-se no Apêndice E.

5.5.2.3 Validação dos Modelos Takagi-Sugeno do Grupo I

A predição *off-line* da temperatura de condensação do sistema de refrigeração pode ser observada na Figura 5.46. O modelo *Fuzzy* prediz de uma forma confiável a temperatura de condensação do sistema, o que pode-se confirmar observando a Figura

5.47. Nesta figura, a distribuição dos dados reais com os preditos apresenta uma dispersão de $\pm 0,5$ °C, o que está dentro do erro especificado do equipamento de medição (sensores de temperatura tipo Pt100).

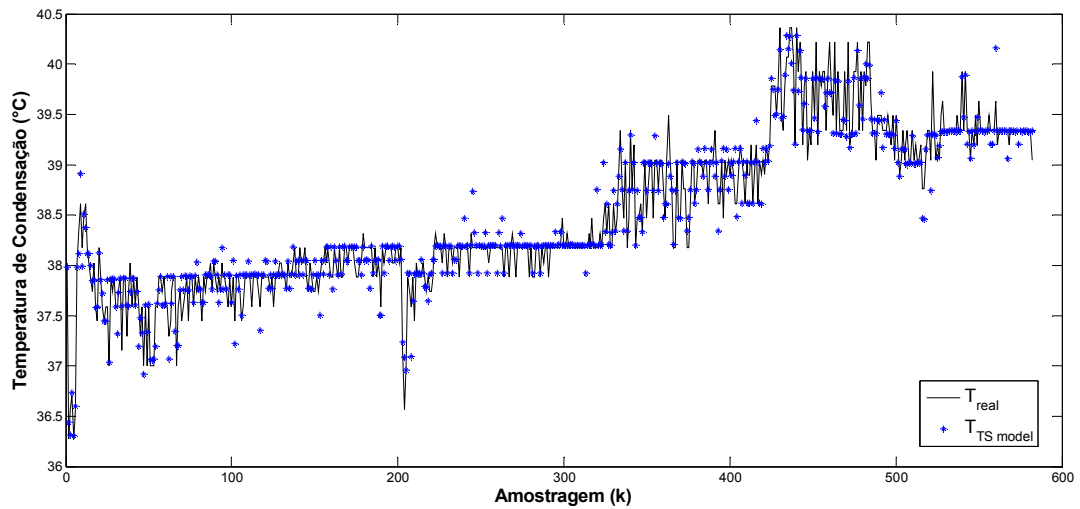


Figura 5. 46 - Predição, *off-line*, da temperatura de condensação, Tcond

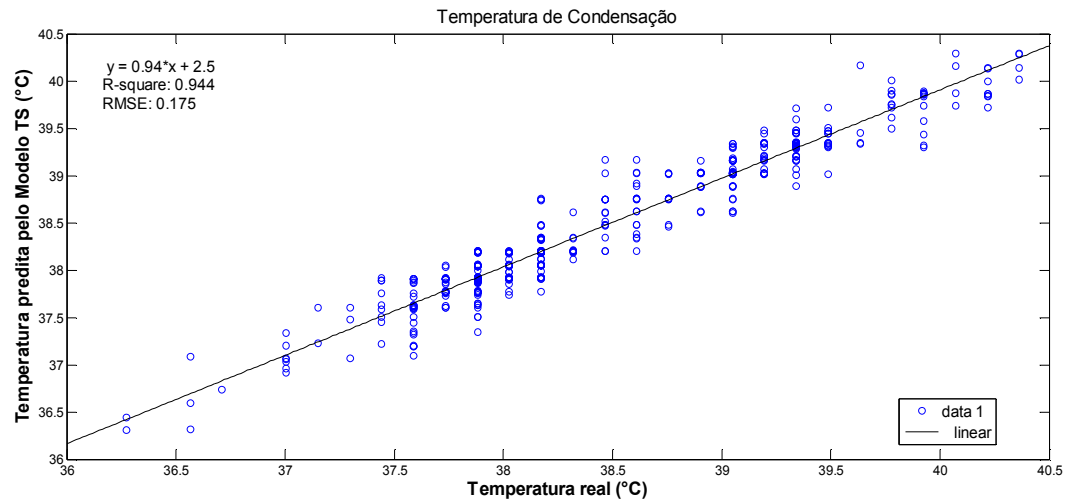


Figura 5. 47 – Distribuição dos dados reais com os dados preditos pelo modelo *Fuzzy* da temperatura de condensação (validação *off-line*)

Na Figura 5.48 observa-se a predição *off-line* da temperatura de evaporação do sistema de refrigeração. O modelo *Fuzzy* da temperatura de evaporação representa muito bem a dinâmica da temperatura de evaporação. Na Figura 5.49, a representação desta boa predição é observada levando em consideração a dispersão dos dados reais com os predito pelo modelo *fuzzy*, dispersão esta que fica em torno de $\pm 0,5$ °C.

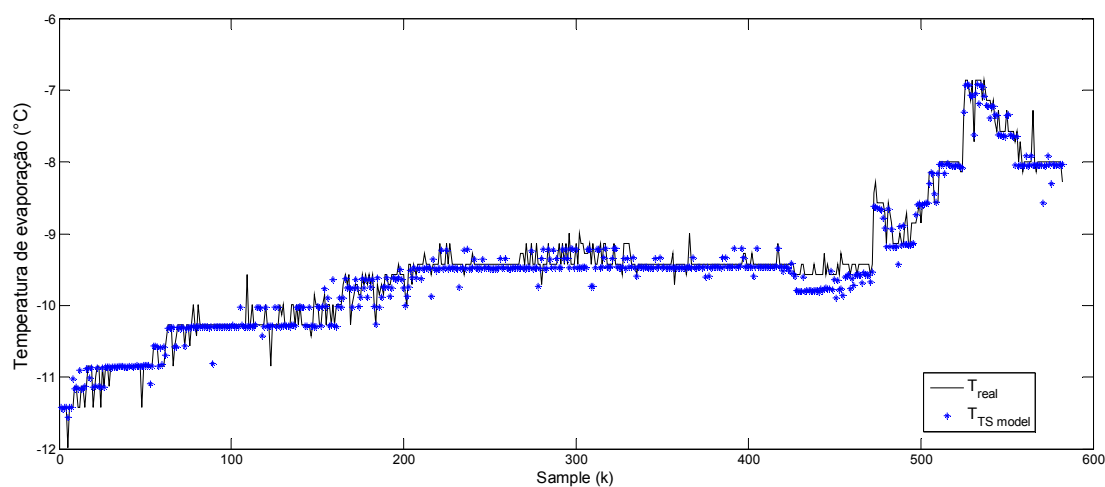


Figura 5. 48 – Predição, *off-line*, da temperatura de evaporação, T_{evap}

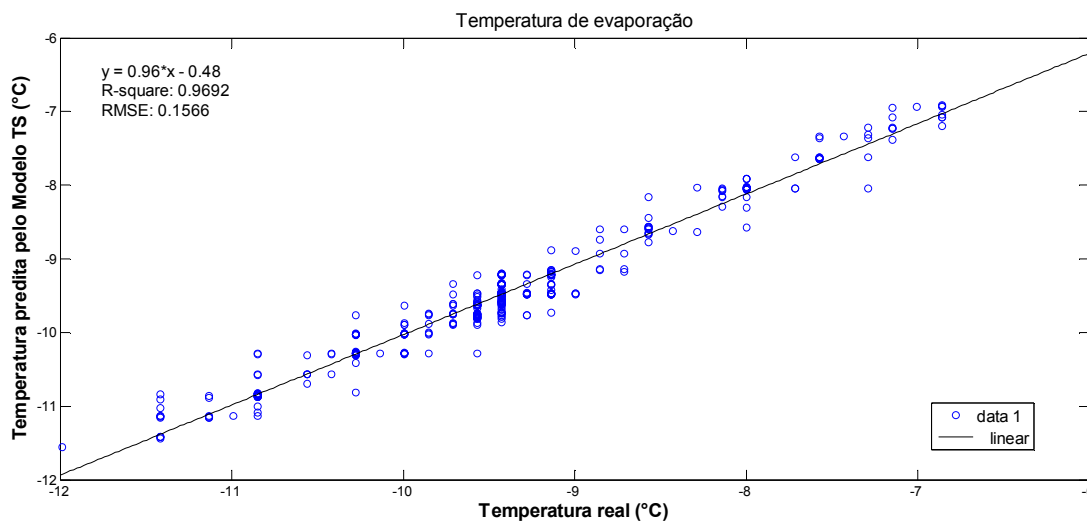


Figura 5. 49 – Distribuição dos dados reais com os dados preditos pelo modelo *Fuzzy* da temperatura de evaporação (validação *off-line*)

Assim com os modelos *Fuzzy* das temperaturas de condensação e evaporação (T_{cond} e T_{evap} , respectivamente), o modelo *Fuzzy* da temperatura do propilenoglicol, T_{prop} , apresentou uma predição confiável (Figura 5.50), confirmada pela dispersão dos dados em torno de $\pm 0,5$ °C, Figura 5.51.

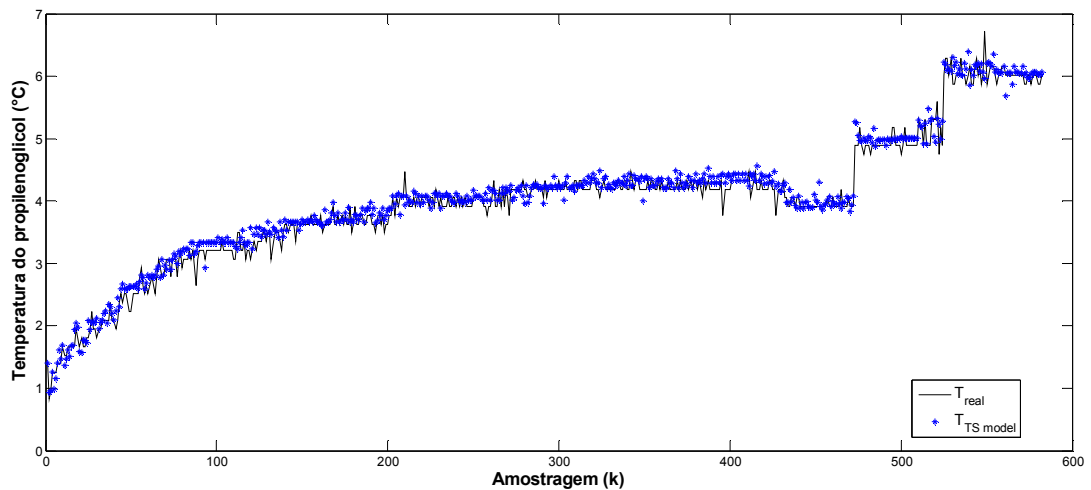


Figura 5. 50 - Predição, *off-line*, da temperatura do propilenoglicol, T_{prop}

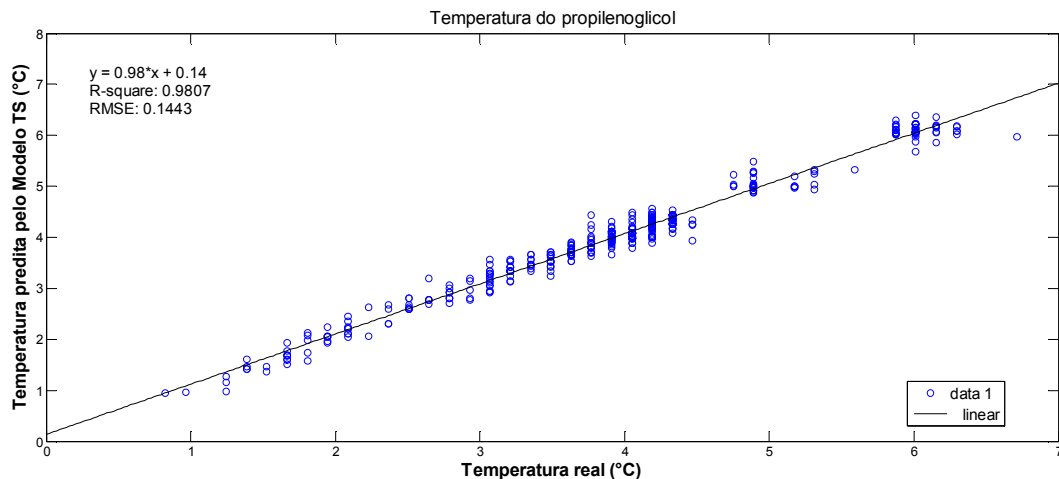


Figura 5. 51 – Distribuição dos dados reais com os dados preditos pelo modelo *Fuzzy* da temperatura do propilenoglicol (validação *off-line*)

Pode-se confirmar a boa predição dos modelos *fuzzy* desenvolvendo apresentando o índice de desempenho de cada um dos modelos através do VAF (*variance accounted for*), Tabela 5.11. Para que um modelo represente de uma forma precisa o sistema real o VAF deve ser maior que 97.0%, (BABUSKA et al. 1998). O VAF é determinado por:

$$VAF = \left[1 - \frac{var(Y-Y_m)}{var(Y)} \right] \times 100\% \quad (\text{Eq. 5.4})$$

Onde: Y é a variável real do processo e Y_m a variável predita pelo modelo *Fuzzy*.

Tabela 5. 11 – VAF (*variance accounted for*) para os modelos de predição TS

Modelo de predição <i>fuzzy</i> para:	Predição <i>off-line</i>
Temperatura de Condensação	94.26 %
Temperatura de evaporação	97.17 %
Temperatura do propilenoglicol	98.04 %

5.5.3 Modelos Takagi-Sugeno II (Sistema de refrigeração utilizando compressor semi-hermético)

A identificação para o sistema de refrigeração, contendo um compressor semi-hermético, foi realizada de forma diferente ao sistema de refrigeração utilizando um compressor aberto (descrito anteriormente). Como descrito na seção 4.2.3.3, o sinal gerado para a identificação, foi um sinal aleatório.

5.5.3.1 Obtenção do tempo de assentamento das variáveis do modelo TS

. Para a identificação do sistema, aplicou-se degrau em duas variáveis do processo: a frequência do compressor (*FQ101*) e da bomba do evaporador (*FQ201*) e as variáveis analisadas foram a temperatura do propilenoglicol (*Tp*) e a temperatura de evaporação (*Te*), que serão as variáveis preditas nos Modelos TS, Figuras 5.52 e 5.56.

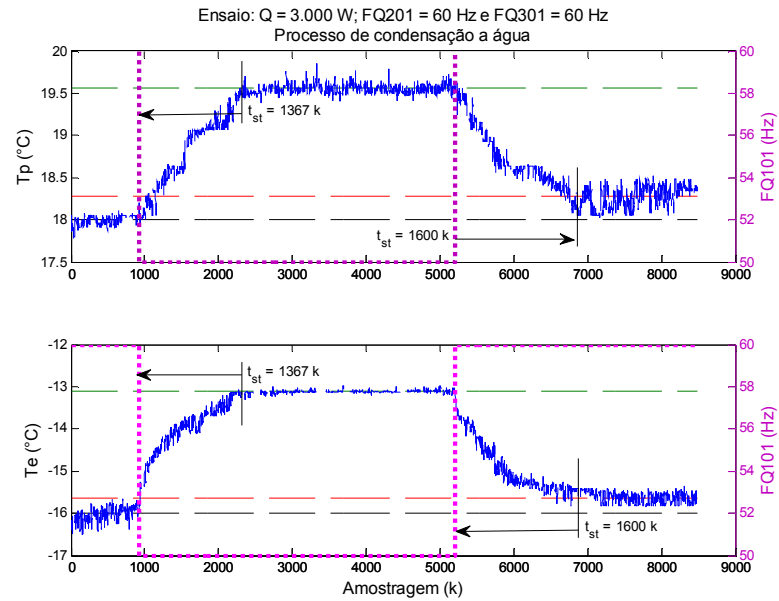


Figura 5. 52 – Determinação do tempo de assentamento das variáveis Tp (temperatura do propilenoglicol) e Te (temperatura de evaporação) para variação na frequência do compressor (60-50-60 Hz)

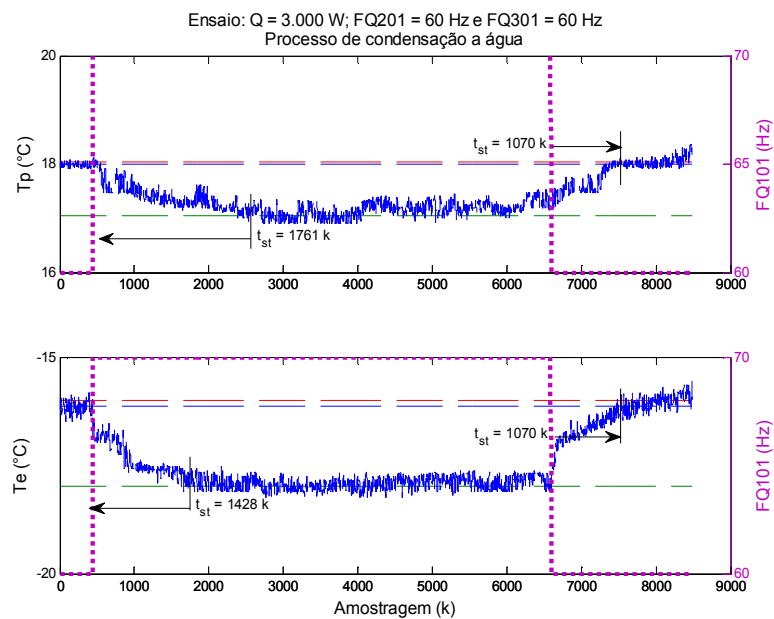


Figura 5. 53 – Determinação do tempo de assentamento das variáveis Tp (temperatura do propilenoglicol) e Te (temperatura de evaporação) para variação na frequência do compressor (60-70-60 Hz)

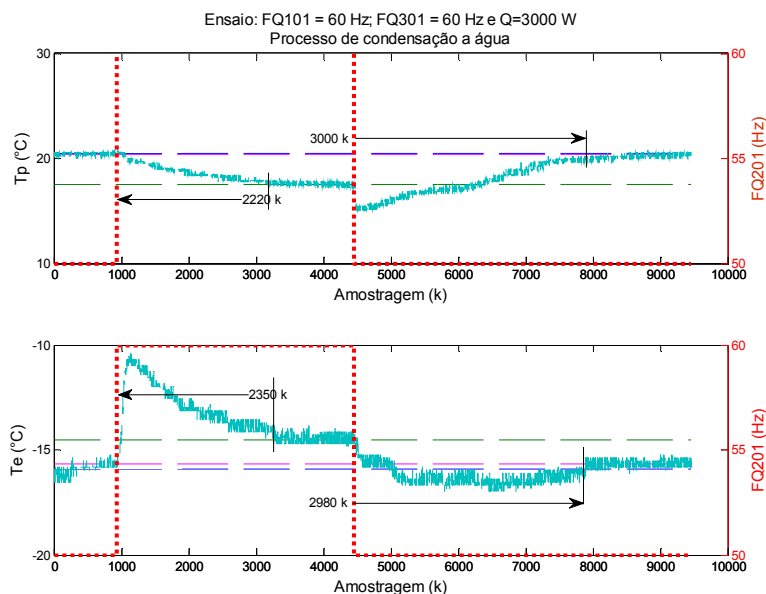


Figura 5. 54 – Determinação do tempo de assentamento das variáveis T_p (temperatura do propilenoglicol) e T_e (temperatura de evaporação) para variação na frequência da bomba do evaporador (50-60-50 Hz)

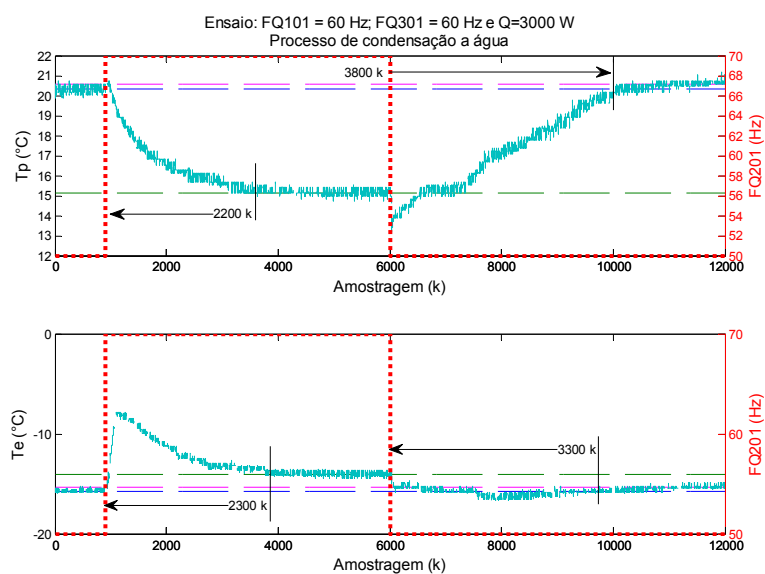


Figura 5. 55 – Determinação do tempo de assentamento das variáveis T_p (temperatura do propilenoglicol) e T_e (temperatura de evaporação) para variação na frequência da bomba do evaporador (50-70-50 Hz)

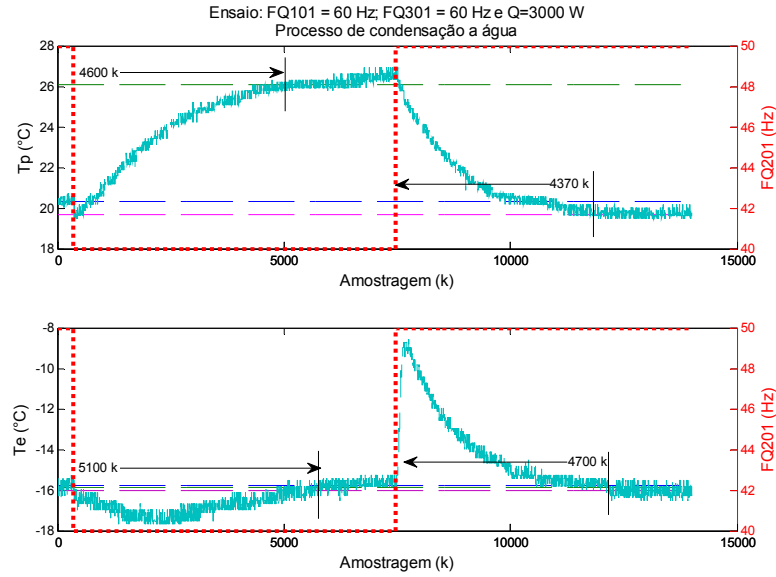


Figura 5. 56 – Determinação do tempo de assentamento das variáveis Tp (temperatura do propilenoglicol) e Te (temperatura de evaporação) para variação na frequência da bomba do evaporador (50-40-50 Hz)

Os valores obtidos para os tempos de assentamentos, t_{st} , das variáveis (Figuras 5.52 a 5.56) foram utilizados para a determinação dos tempos de mudança, t_{sw} , do sinal aleatório usado na identificação (Equação 4.1).

5.5.3.2 Resultados para identificação dos modelos de predição da temperatura de condensação, da temperatura de evaporação e da temperatura do propilenoglicol

Para o treinamento ANFIS utilizou-se os dados, gerados através do sinal aleatório já descrito anteriormente, apresentados na Figura 5.57 e 5.58. As variáveis para o desenvolvimento dos modelos TS foram utilizadas como variáveis desvio, ou seja, variável medida subtraída do estado estacionário.

Na Figura 5.57 são apresentados os resultados da identificação do sistema quando a frequência do compressor foi submetida a uma perturbação aleatória gerada pelo sinal de identificação.

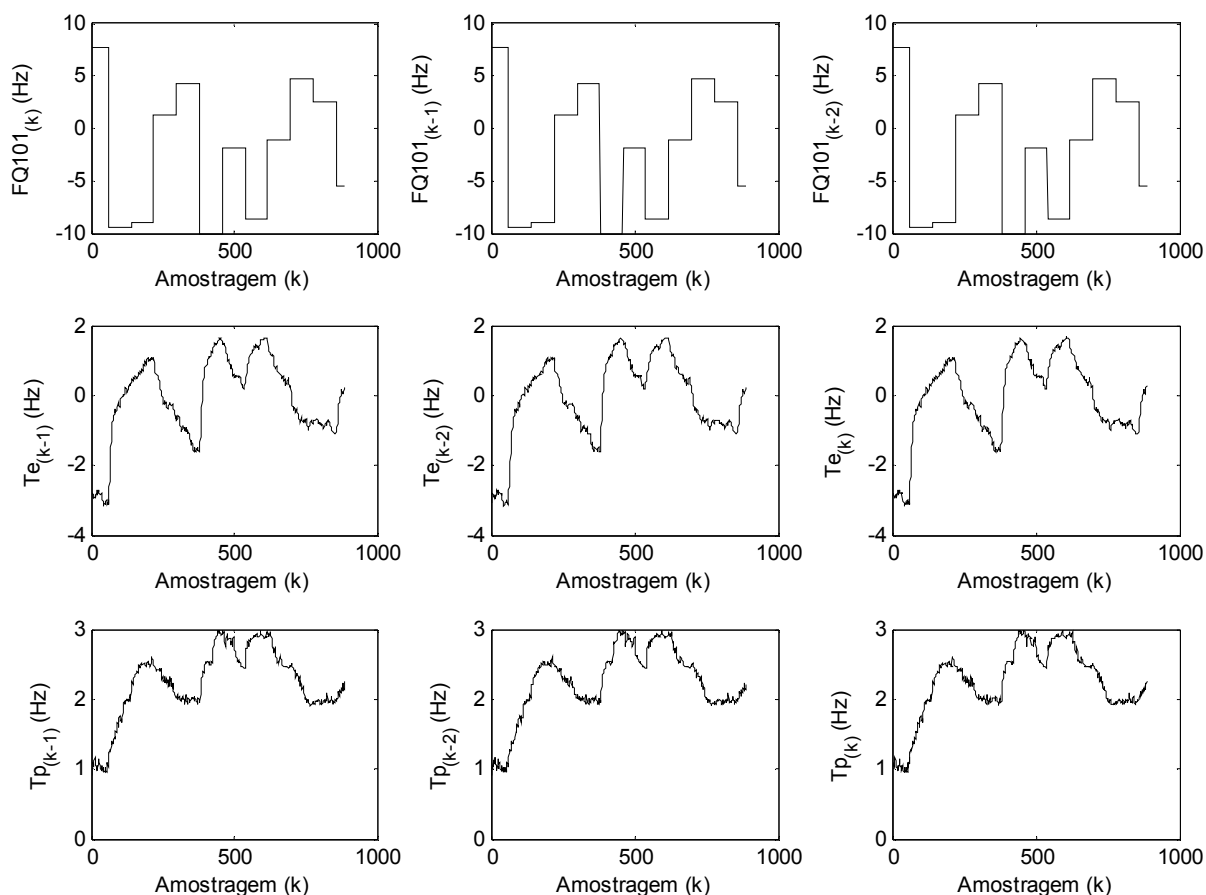


Figura 5. 57 – Dados para o treinamento ANFIS para a determinação dos Modelos Takagi-Sugeno para as temperaturas de evaporação e do propilenoglicol (*Grupo I: Variação na frequência do compressor FQ101*)

A identificação do sistema, quando da perturbação na frequência da bomba do evaporador, foi realizada com dados de ensaio diferente, por isso não são apresentadas na Figura 5.57 e sim na Figura 5.58.

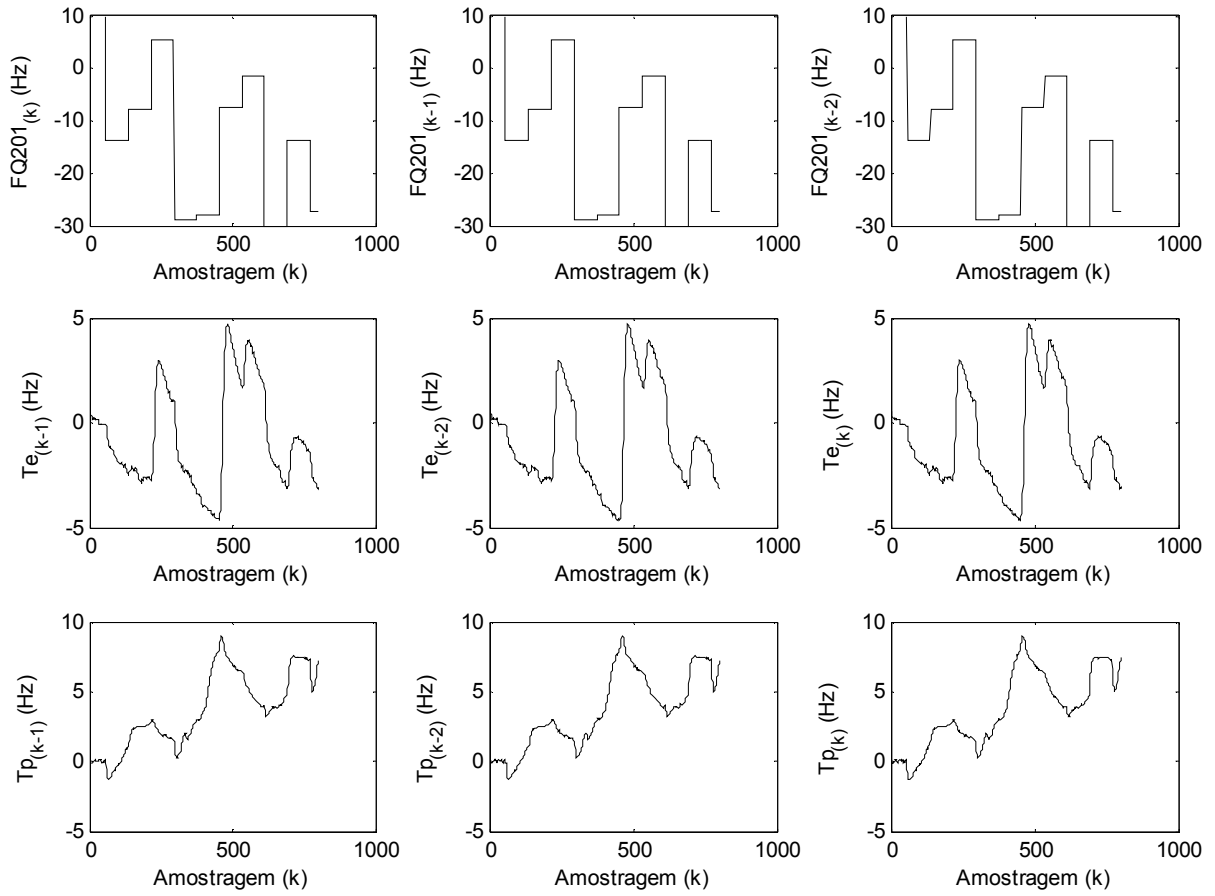


Figura 5. 58 - Dados para o treinamento ANFIS para a determinação dos Modelos Takagi-Sugeno para as temperaturas de evaporação e do propilenoglicol (*Grupo II: Variação na frequência da bomba do evaporador FQ201*)

5.5.3.4 Treinamento ANFIS para a determinação dos Modelos Takagi-Sugeno para o Grupo I (*Variação na frequência do compressor (FQ101)*)

Para o desenvolvimento dos modelos TS para a predição da temperatura de evaporação (T_e) foram utilizadas as seguintes variáveis linguística: “*LM para Low-*

Medium”, “M para Medium”, “HL para High-Low”, “HM para High-Medium” e “HH para High- High”.

O modelo *fuzzy* para a temperatura de evaporação, Te , é composto por cinco entradas ($FQ101_{(k)}$, $FQ101_{(k-1)}$, $FQ101_{(k-2)}$, $Te_{(k-1)}$ e $Te_{(k-2)}$) e quatro funções de pertinência para cada entrada. As funções de pertinência, μ_i , e consequentemente do conjunto *fuzzy* correspondente ao modelo *fuzzy* da temperatura de evaporação são ilustrados na Figura 5.59, sendo todos os conjuntos descritos em $\mathcal{R} \rightarrow [0,1]$.

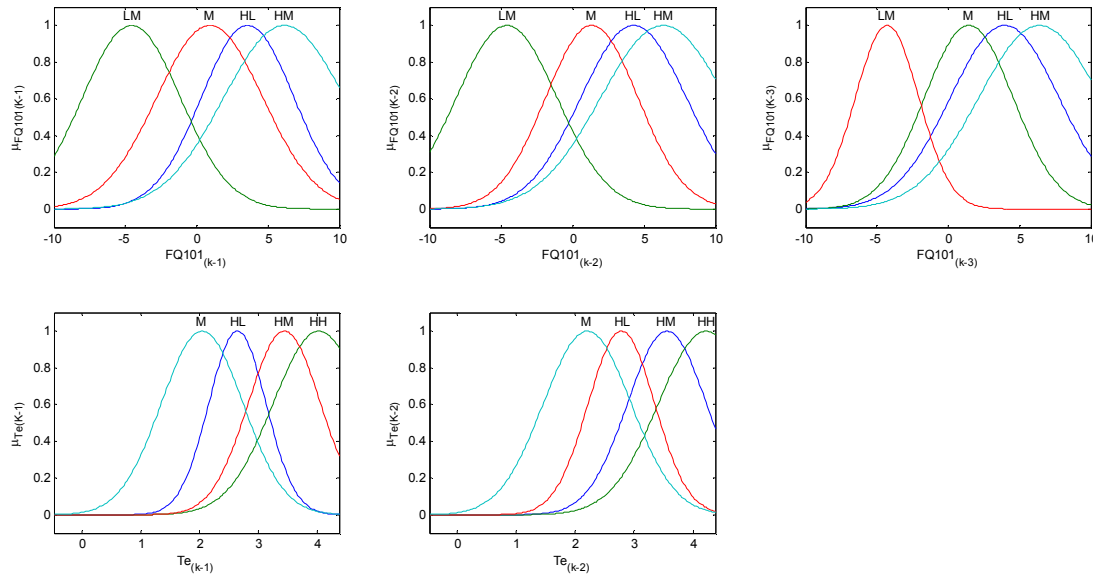


Figura 5. 59 – Conjunto *Fuzzy* e funções de pertinência do modelo Takagi-Sugeno da temperatura de evaporação em função da frequência do compressor

O modelo *Fuzzy* TS para a temperatura do propilenoglicol, Tp , é composto por cinco entradas ($FQ101_{(k)}$, $FQ101_{(k-1)}$, $FQ101_{(k-2)}$, $Tp_{(k-1)}$ e $Tp_{(k-2)}$) e quatro funções de pertinência para cada entrada, sendo as funções de pertinência, μ_i , e consequentemente

do conjunto *fuzzy* correspondente ao modelo *fuzzy* da temperatura do propilenoglicol apresentados na Figura 5.60, todos os conjuntos descritos em $\mathcal{R} \rightarrow [0,1]$.

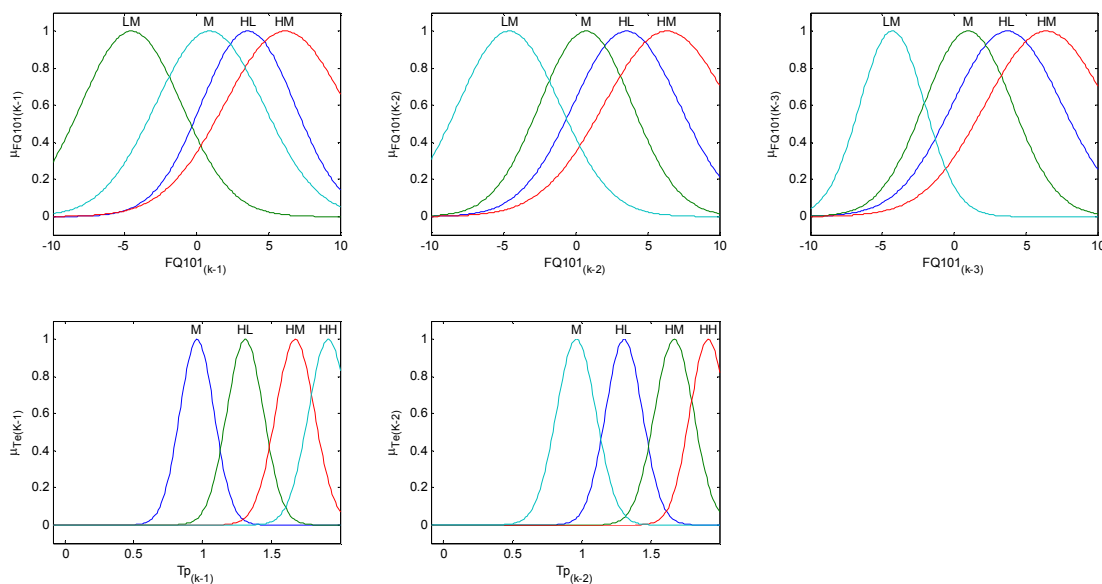


Figura 5. 60 - Conjunto *Fuzzy* e funções de pertinência do modelo Takagi-Sugeno da temperatura do propilenoglicol em função da frequência do compressor

Os antecedentes das regras *Fuzzy*, determinadas pelo método do agrupamento subtrativo (*subtractive clustering*) são apresentados na Tabela 5.12. Obteve-se com o treinamento ANFIS os consequentes para os modelos *fuzzy* das temperaturas de evaporação e do propilenoglicol descritos na Tabela 5.13, onde: q_{ij} são os parâmetros do modelo *Fuzzy*.

Tabela 5. 12 – Antecedentes das regras fuzzy para os modelos Takagi-Sugeno para predição da: Temperatura de evaporação e Temperatura do propilenoglicol

Modelo TS para temperatura de evaporação					
$FQ101_{(k-1)}$	$FQ101_{(k-2)}$	$FQ101_{(k-3)}$	$Te_{(k-1)}$	$Te_{(k-2)}$	Te
HL	HL	HL	HL	HM	Te_1
LM	LM	–	–	–	Te_2
M	M	M	HM	HL	Te_3
–	–	LM	–	–	Te_4
HM	HM	HM	M	M	Te_5
Modelo TS para temperatura do propilenoglicol					
$FQ101_{(k)}$	$FQ101_{(k-1)}$	$FQ101_{(k-2)}$	$TP_{(k-1)}$	$TP_{(k-2)}$	TP
HL	HL	HL	–	HL	TP_1
–	–	–	M	–	TP_2
LM	M	M	HL	HM	TP_3
HM	HM	HM	–	–	TP_4
M	LM	LM	HM	HH	TP_5
–	–	–	HH	M	TP_6

Tabela 5. 13 – Consequentes obtidos para os modelos Takagi-Sugeno para predição da: Temperatura de condensação; Temperatura de evaporação e Temperatura do propilenoglicol

Modelo TS para temperatura de evaporação						
Te	q_{i0}	q_{i1}	q_{i2}	q_{i3}	q_{i4}	q_{i5}
Te_1	$-108,261 \times 10^{-2}$	$-78,335 \times 10^{-2}$	$149,827 \times 10^{-2}$	$-43,019 \times 10^{-2}$	$-16,741 \times 10^{-2}$	$91,239 \times 10^{-2}$
Te_2	$8,110 \times 10^{-2}$	$-0,700 \times 10^{-2}$	$-1,803 \times 10^{-2}$	$1,835 \times 10^{-2}$	$55,925 \times 10^{-2}$	$41,310 \times 10^{-2}$
Te_3	$102,881 \times 10^{-2}$	$28,937 \times 10^{-2}$	$-90,367 \times 10^{-2}$	$72,283 \times 10^{-2}$	$22,549 \times 10^{-2}$	$53,374 \times 10^{-2}$
Te_4	$9,463 \times 10^{-2}$	$-0,883 \times 10^{-2}$	$1,081 \times 10^{-2}$	$-0,104 \times 10^{-2}$	$155,741 \times 10^{-2}$	$-58,552 \times 10^{-2}$
Te_5	$-0,696 \times 10^{-2}$	$1,537 \times 10^{-2}$	$-4,108 \times 10^{-2}$	$2,557 \times 10^{-2}$	$104,013 \times 10^{-2}$	$-3,890 \times 10^{-2}$
Modelo TS para temperatura do propilenoglicol						
TP	q_{i0}	q_{i1}	q_{i2}	q_{i3}	q_{i4}	q_{i5}
TP_1	$0,036 \times 10^{-2}$	$0,862 \times 10^{-2}$	$-0,707 \times 10^{-2}$	$67,202 \times 10^{-2}$	$33,879 \times 10^{-2}$	$-3,511 \times 10^{-2}$
TP_2	$-0,091 \times 10^{-2}$	$-0,009 \times 10^{-2}$	$-0,055 \times 10^{-2}$	$90,765 \times 10^{-2}$	$9,139 \times 10^{-2}$	$0,192 \times 10^{-2}$
TP_3	$0,073 \times 10^{-2}$	$-0,547 \times 10^{-2}$	$0,892 \times 10^{-2}$	$103,053 \times 10^{-2}$	$-22,349 \times 10^{-2}$	$29,339 \times 10^{-2}$
TP_4	$-0,235 \times 10^{-2}$	$-0,048 \times 10^{-2}$	$-0,729 \times 10^{-2}$	$75,876 \times 10^{-2}$	$20,250 \times 10^{-2}$	$8,436 \times 10^{-2}$
TP_5	$-0,030 \times 10^{-2}$	$-0,189 \times 10^{-2}$	$-0,058 \times 10^{-2}$	$94,478 \times 10^{-2}$	$-2,577 \times 10^{-2}$	$13,195 \times 10^{-2}$
TP_6	$-7,062 \times 10^{-2}$	$-49,351 \times 10^{-2}$	$51,435 \times 10^{-2}$	$300,506 \times 10^{-2}$	$-288,440 \times 10^{-2}$	$78,672 \times 10^{-2}$

5.5.3.5 Treinamento ANFIS para a determinação dos Modelos Takagi-Sugeno para o Grupo II (Variação na frequência da bomba do evaporador (FQ201))

As seguintes variáveis linguísticas utilizadas para o desenvolvimento dos modelos TS para a predição da temperatura de evaporação (Te) são: “LL para Low- Low”, “LM para Low-Medium”, “LH para Low-High”, “M para Medium”, “HL para High-Low”, “HM para High-Medium” e “HH para High- High”.

O modelo *fuzzy* para a temperatura de evaporação, Te , é composto por cinco entradas ($FQ101_{(k)}$, $FQ101_{(k-1)}$, $FQ101_{(k-2)}$, $Te_{(k-1)}$ e $Te_{(k-2)}$) e cinco funções de pertinência para cada entrada. As funções de pertinência, μ_i , e consequentemente do conjunto *fuzzy* correspondente ao modelo *fuzzy* da temperatura de evaporação são ilustrados na Figura 5.61, sendo todos os conjuntos descritos em $\mathcal{R} \rightarrow [0,1]$.

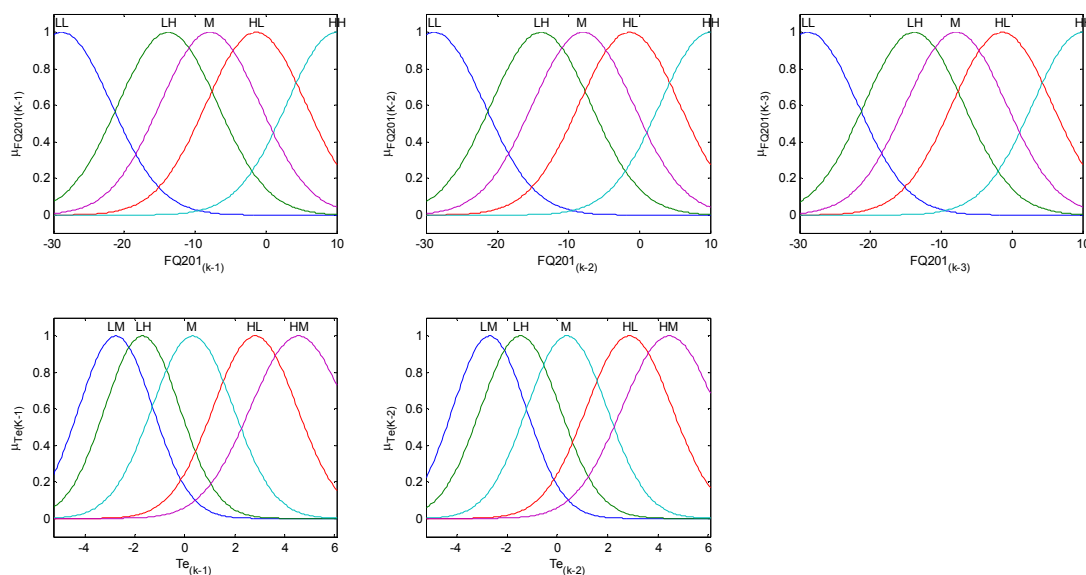


Figura 5. 61 – Conjunto *Fuzzy* e funções de pertinência do modelo Takagi-Sugeno da temperatura de evaporação em função da frequência da bomba do evaporador

O modelo *fuzzy* TS para a temperatura do propilenoglicol, T_p , é composto por cinco entradas ($FQ101_{(k)}$, $FQ101_{(k-1)}$, $FQ101_{(k-2)}$, $Tp_{(k-1)}$ e $Tp_{(k-2)}$) e quatro funções de pertinência para cada entrada. Sendo as funções de pertinência, μ_i , e consequentemente do conjunto *fuzzy* correspondente ao modelo *fuzzy* da temperatura do propilenoglicol apresentados na Figura 5.62, sendo todos os conjuntos descritos em $\mathcal{R} \rightarrow [0,1]$.

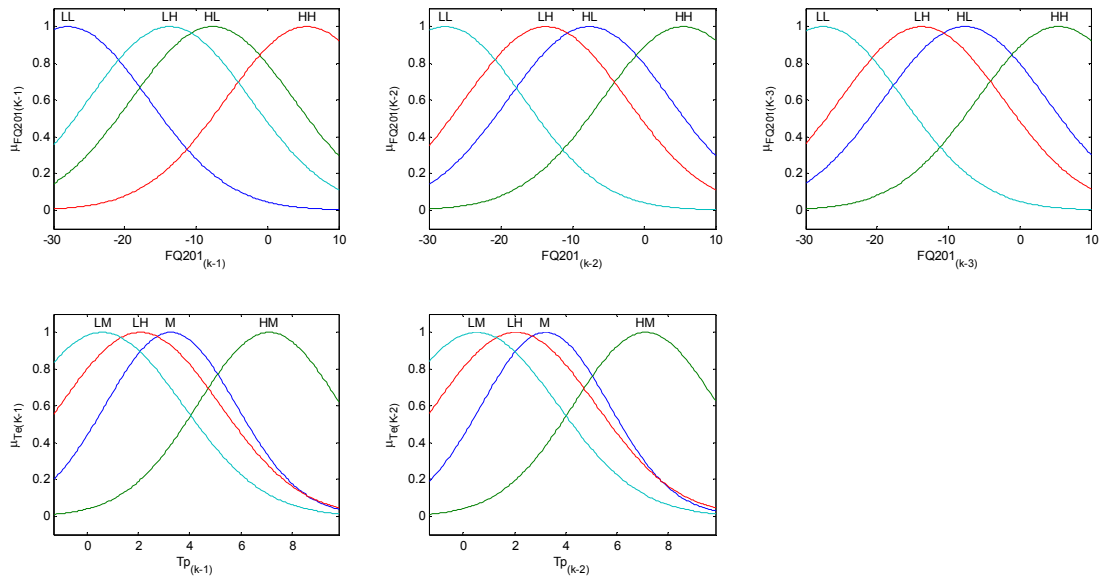


Figura 5. 62 – Conjunto *Fuzzy* e funções de pertinência do modelo Takagi-Sugeno da temperatura do propilenoglicol em função da frequência da bomba do evaporador

Utilizando-se o método do agrupamento subtrativo (*subtractive clustering*), obteve-se os antecedentes das regras *Fuzzy* apresentados na Tabela 5.14. Os consequentes para os modelos *fuzzy* das temperaturas de evaporação e do propilenoglicol são descritos na Tabela 5.15, onde: q_{ij} são os parâmetros do modelo *fuzzy*.

Tabela 5. 14 – Antecedentes das regras fuzzy para os modelos Takagi-Sugeno para predição da: Temperatura de evaporação e Temperatura do propilenoglicol em função da frequência da bomba do evaporador

Modelo TS para temperatura de evaporação					
$FQ201_{(k-1)}$	$FQ201_{(k-2)}$	$FQ201_{(k-3)}$	$Te_{(k-1)}$	$Te_{(k-2)}$	Te
LL	LL	LL	LM	LM	Te_1
LH	LH	LH	LH	LH	Te_2
HL	HL	HL	HL	HL	Te_3
HH	HH	HH	M	M	Te_4
M	M	M	–	–	Te_5
–	–	–	HM	HM	Te_6
Modelo TS para temperatura do propilenoglicol					
$FQ201_{(k)}$	$FQ201_{(k-1)}$	$FQ201_{(k-2)}$	$Tp_{(k-1)}$	$Tp_{(k-2)}$	Tp
LL	–	–	M	M	Tp_1
HL	HL	HL	HM	HM	Tp_2
HH	HH	HH	LH	LH	Tp_3
LH	LH	LH	LM	LM	Tp_4
–	LL	LL	–	–	Tp_5

Tabela 5. 15 – Consequentes obtidos para os modelos Takagi-Sugeno para predição da: Temperatura de condensação; Temperatura de evaporação e Temperatura do propilenoglicol em função da frequência da bomba do evaporador

Modelo TS para temperatura de evaporação						
Te	q_{i0}	q_{i1}	q_{i2}	q_{i3}	q_{i4}	q_{i5}
Te_1	-37.752×10^{-2}	-0.344×10^{-2}	0.411×10^{-2}	-1.114×10^{-2}	135.768×10^{-2}	-37.751×10^{-2}
Te_2	-22.201×10^{-2}	0.100×10^{-2}	-0.954×10^{-2}	-0.367×10^{-2}	136.521×10^{-2}	-38.509×10^{-2}
Te_3	11.130×10^{-2}	-1.905×10^{-2}	0.799×10^{-2}	-0.053×10^{-2}	196.748×10^{-2}	-100.485×10^{-2}
Te_4	11.301×10^{-2}	-0.188×10^{-2}	-21.936×10^{-2}	21.003×10^{-2}	178.909×10^{-2}	-81.798×10^{-2}
Te_5	-5.814×10^{-2}	0.585×10^{-2}	-0.937×10^{-2}	-0.363×10^{-2}	206.312×10^{-2}	-107.262×10^{-2}
Te_6	-10.552×10^{-2}	0.015×10^{-2}	0.511×10^{-2}	-0.058×10^{-2}	132.432×10^{-2}	-28.845×10^{-2}
Modelo TS para temperatura do propilenoglicol						
Tp	q_{i0}	q_{i1}	q_{i2}	q_{i3}	q_{i4}	q_{i5}
Tp_1	78.661×10^{-2}	2.819×10^{-2}	0.402×10^{-2}	-0.262×10^{-2}	180.476×10^{-2}	-78.848×10^{-2}
Tp_2	-7.966×10^{-2}	5.764×10^{-2}	-5.118×10^{-2}	-1.623×10^{-2}	160.586×10^{-2}	-60.571×10^{-2}
Tp_3	0.045×10^{-2}	0.974×10^{-2}	-0.993×10^{-2}	0.025×10^{-2}	110.681×10^{-2}	-11.787×10^{-2}
Tp_4	-22.359×10^{-2}	-0.286×10^{-2}	3.419×10^{-2}	-5.034×10^{-2}	147.972×10^{-2}	-51.965×10^{-2}
Tp_5	-51.603×10^{-2}	0.171×10^{-2}	-0.272×10^{-2}	-1.751×10^{-2}	154.106×10^{-2}	-53.802×10^{-2}

A representação explícita das regras *fuzzy* do modelo Takagi-Sugeno, com base nas Tabelas 5.12 a 5.15, encontra-se no Apêndice E.

5.5.3.6 Validação dos Modelos Takagi-Sugeno para predição das temperaturas de evaporação e do propilenoglicol em função da frequência do compressor

Na Figura 5.63 pode-se observar a predição, *off-line*, da temperatura de evaporação (Te) do sistema de refrigeração tendo como variável manipulada a frequência do compressor ($FQ101$).

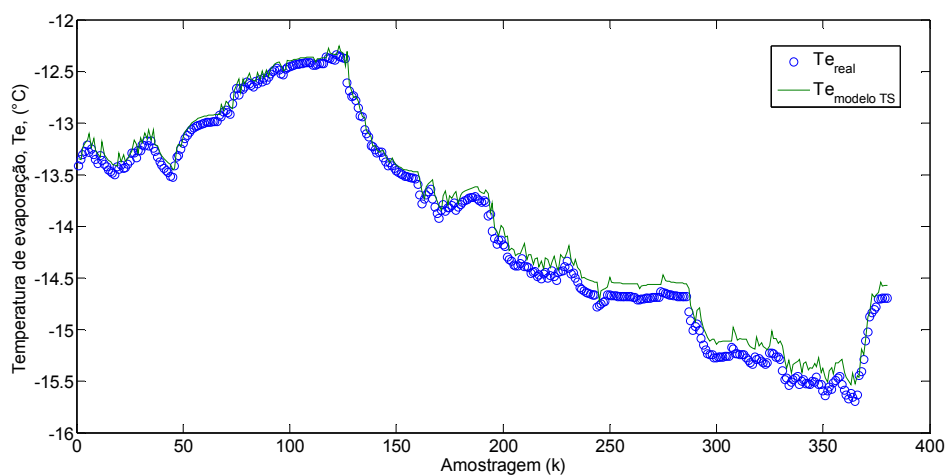


Figura 5. 63 – Predição, off-line, da temperatura de evaporação utilizando modelo TS em função da frequência do compressor

O modelo Takagi-Sugeno da temperatura de evaporação apresentou boa predição da dinâmica da variável. Isto pode ser melhor observado na Figura 5.64, que representa a dispersão dos dados reais com os dados preditos. A dispersão representa $\pm 0,25$ °C, que estão dentro da precisão do sensor de temperatura (Tabela 4.4).

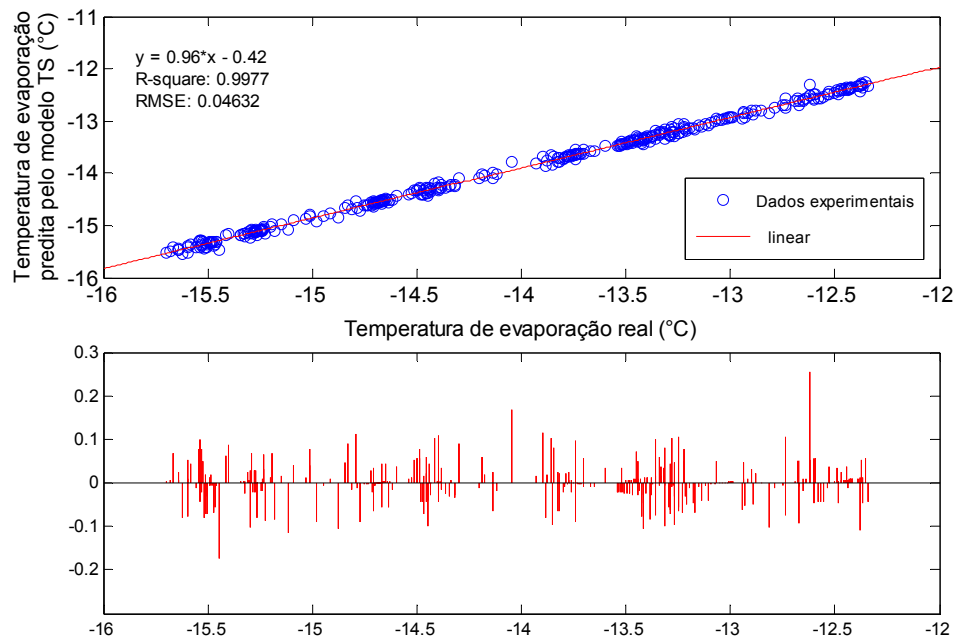


Figura 5. 64 – Distribuição dos dados reais como os dados preditos pelo modelo TS (temperatura de evaporação em função da frequência do compressor)

A validação, *off-line*, do modelo TS de predição da temperatura do propilenoglicol (T_p), pode ser observada na Figura 5.65.

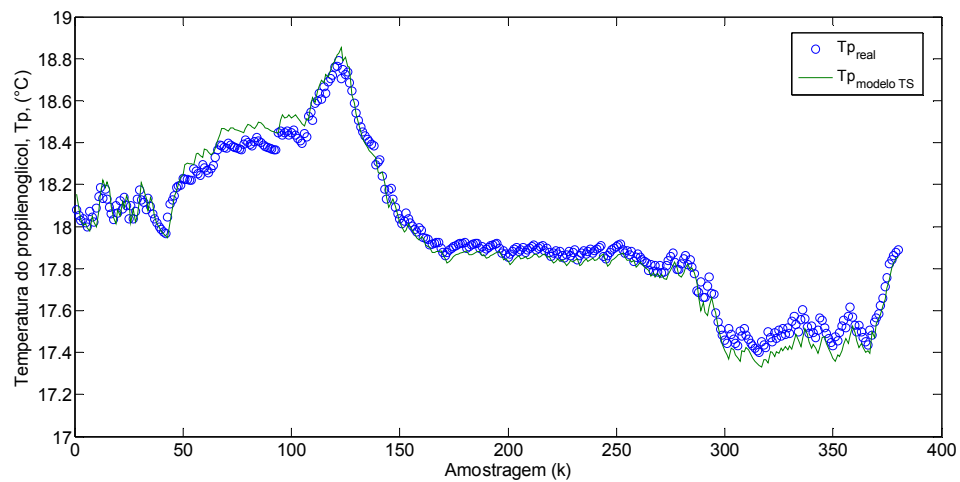


Figura 5. 65 - Predição, *off-line*, da temperatura do propilenoglicol utilizando modelo TS em função da frequência do compressor

A boa predição da dinâmica da temperatura do propilenoglicol pode ser verificada na Figura 5.66, que relaciona os valores reais de temperatura com os valores preditos pelo modelo TS. A dispersão de $\pm 0,1$ °C apresenta-se dentro da faixa de precisão do sensor.

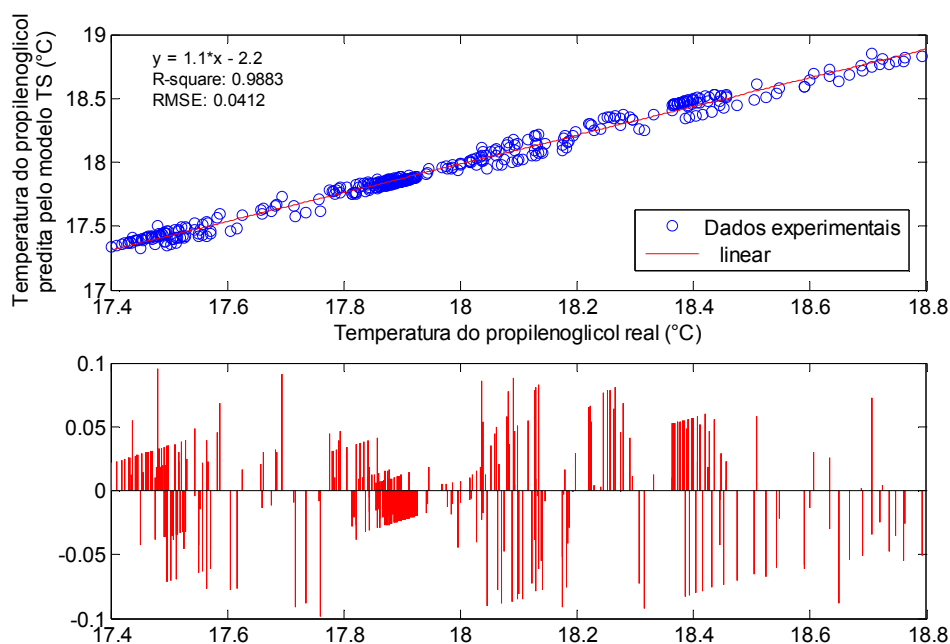


Figura 5. 66 – Distribuição dos dados reais como os dados preditos pelo modelo TS (temperatura do propilenoglicol em função da frequência do compressor)

5.5.3.7 Validação dos Modelos Takagi-Sugeno para predição das temperaturas de evaporação e do propilenoglicol em função da frequência da bomba do evaporador

A validação da predição, *off-line*, da temperatura do propilenoglicol (T_p) do sistema de refrigeração tendo como variável manipulada a frequência da bomba do evaporador (FQ201), é representada na Figura 5.67.

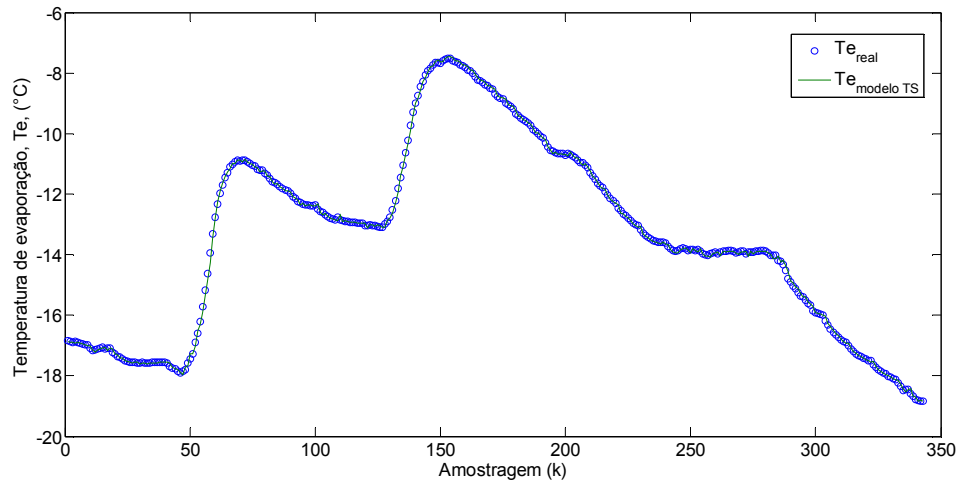


Figura 5. 67 - Predição, off-line, da temperatura de evaporação utilizando modelo TS em função da frequência da bomba do evaporador

Na Figura 5.68 pode-se verificar que a dispersão dos dados experimentais com os dados preditos pelo modelo TS é de aproximadamente $\pm 0,3\ ^\circ\text{C}$.

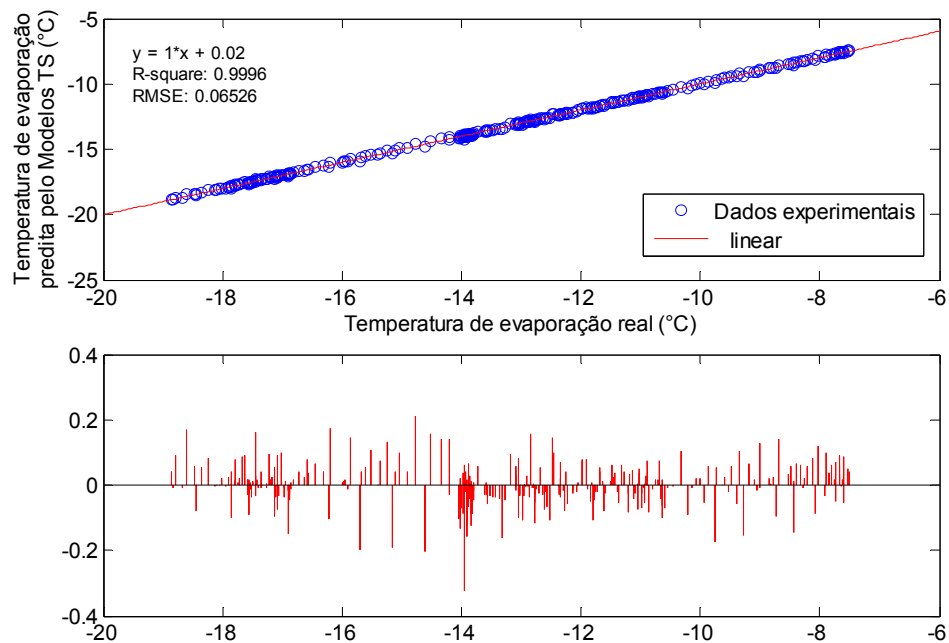


Figura 5. 68 – Distribuição dos dados reais como os dados preditos pelo modelo TS (temperatura do propilenoglicol em função da frequência do compressor)

Na Figura 5.69 pode-se verificar a validação, *off-line*, do Modelo TS para predição da temperatura do propilenoglicol. A boa predição do modelo pode ser confirmada verificando-se a Figura 5.70, onde a dispersão dos dados está em torno de $\pm 0,4$ °C.

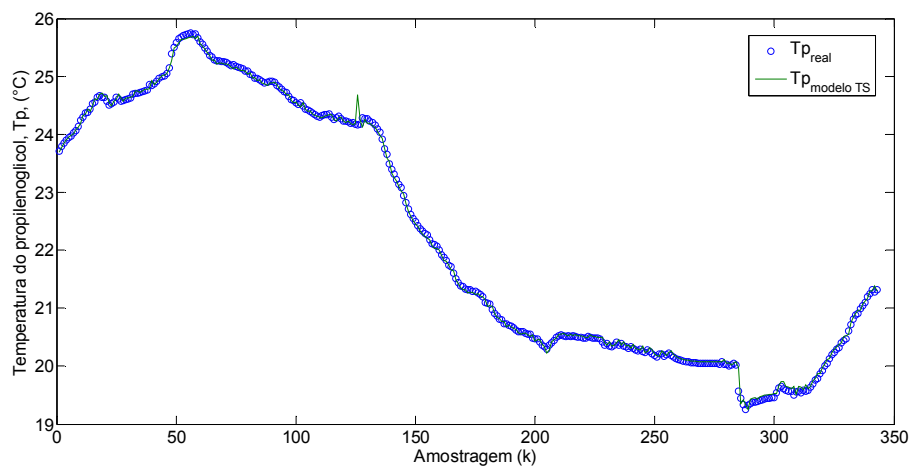


Figura 5. 69 - Predição, off-line, da temperatura do propilenoglicol utilizando modelo TS em função da frequência da bomba do evaporador

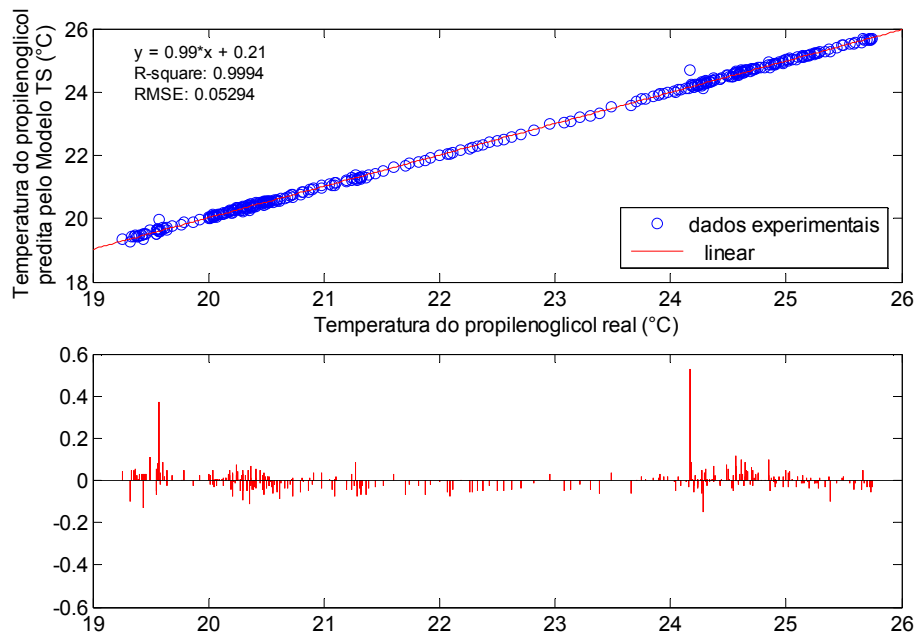


Figura 5. 70 – Distribuição dos dados reais como os dados preditos pelo modelo TS (temperatura do propilenoglicol em função da frequência da bomba do evaporador)

A confirmação da boa predição dos modelos *fuzzy* desenvolvidos pode ser observada na Tabela 5.16 onde encontram-se os valores do VAF para os modelos desenvolvidos.

Tabela 5. 16 – VAF (*variance accounted for*) para os modelos de predição Takagi-Sugeno

Modelo de predição TS para:	Modelo TS em função de FQ101 ^a	Modelo TS em função de FQ201 ^b
Temperatura de evaporação	99,78 %	99,96 %
Temperatura do propilenoglicol	98,83 %	99,94%
a frequência do compressor; b frequência da bomba do evaporador		

5.6 Controle Preditivo utilizando modelo Takagi-Sugeno

Neste trabalho utilizou-se modelos Takagi-Sugeno desenvolvidos a partir de técnica ANFIS de identificação. A estratégia de controle utilizada foi baseada no uso de Controlador Preditivo Generalizado (*GPC - Generalized Predictive Control*). Os coeficientes $q_{i,l}$, onde, $i=0... n_{x(entradas)}$ e l o número de Regras *Fuzzy* (RF) dos modelos identificados compõem os modelos lineares locais no controle GPC.

5.6.1 Estrutura do controlador preditivo

Como dito anteriormente, o controle GPC utilizado neste trabalho é composto por um modelo de predição Takagi-Sugeno, apresentado na Equação 5.4:

$$A_{(q)}y_{(k)} = B_{(q)}u_{(k-1)} + e_{(k)}/\Delta \quad (\text{Eq. 5.4})$$

Ou pode-se expressar a Equação 5.4 como:

$$\Delta A_{(q)}y_{(k)} = B_{(q)}\Delta u_{(k-1)} + e_{(k)} \quad (\text{Eq. 5.5})$$

A Equação 5.5 exprime um preditor de um *passo-à-frente*. Porém, Clarke et al. (1987) propõe a predição *j* *passos-à-frente*, mais adequada levando em consideração dados obtidos até o instante *k* como:

$$\hat{y}_{(k+j|k)} = G_{j(q)}\Delta u_{(k+j-1)} + F_{j(q)}y_{(k)} \quad (\text{Eq. 5.6})$$

onde,

$$G_{j(q)} = E_{j(q)}B_{(q)} \quad (\text{Eq. 5.7})$$

e $E_{j(q)}$ e $F_{j(q)}$ são polinômios provenientes da solução identidade de *Bézout*, (Equação 5.8).

$$1 = \Delta A_{(q)}E_{j(q)} + q^{-j}F_{j(q)} \quad (\text{Eq. 5.8})$$

Analogamente ao desenvolvimento do preditor *j* *passos-à-frente* a partir da solução da identidade de *Bézout*, Rossiter (2003) estabeleceu o preditor por meio do uso recursivo da Equação, reescrita da seguinte forma:

$$\hat{A}_{(q)}y_{(k)} = B_{(q)}\Delta u_{(k-1)} \quad (\text{Eq. 5.9})$$

onde:

$$\hat{A}_{(q)} = \Delta A_{(q)} = 1 + \hat{a}_1q^{-1} + \dots + \hat{a}_{n_a+1}q^{-(n_a+1)} \quad (\text{Eq. 5.10})$$

Aplicando a Equação 5.10 em 5.9, pode-se expandi-la em:

$$y_{(k)} + \hat{a}_1y_{(k-1)} + \dots + \hat{a}_{n_a+1}y_{(k-n_a-1)} = b_0\Delta u_{(k-1)} + b_1\Delta u_{(k-2)} + \dots + b_{n_b}\Delta u_{(k-n_b-1)} \quad (\text{Eq. 5.11})$$

Utilizando-se a Equação 5.11 é possível realizar iterações do instante $k+1$ até $k+H_p$:

– **Iteração $k=k+1$**

$$y_{(k+1)} + \hat{a}_1 y_{(k)} + \dots + \hat{a}_{n_a+1} y_{(k-n_a)} = b_0 \Delta u_{(k)} + b_1 \Delta u_{(k-1)} + \dots + b_{n_b} \Delta u_{(k-n_b)} \quad (\text{Eq. 5.12})$$

– **Iteração $k=k+2$**

$$y_{(k+2)} + \hat{a}_1 y_{(k+1)} + \dots + \hat{a}_{n_a+1} y_{(k-n_a+1)} = b_0 \Delta u_{(k+1)} + b_1 \Delta u_{(k)} + \dots + b_{n_b} \Delta u_{(k-n_b+1)} \quad (\text{Eq. 5.13})$$

– **Iteração $k=k+H_p$**

$$y_{(k+H_p)} + \hat{a}_1 y_{(k+H_p+1)} + \dots + \hat{a}_{n_a+1} y_{(k+H_p-n_a-1)} = b_0 \Delta u_{(k+H_p-1)} + b_1 \Delta u_{(k+H_p-2)} + \dots + b_{n_b} \Delta u_{(k+H_p-n_b-1)} \quad (\text{Eq. 5.14})$$

Escrevendo os termos das iterações na forma matricial tem-se:

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 \\ \hat{a}_1 & 1 & \dots & 0 \\ \hat{a}_2 & \hat{a}_1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \hat{y}_{(k+1|k)} \\ \hat{y}_{(k+2|k)} \\ \vdots \\ \hat{y}_{(k+H_p|k)} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \hat{a}_1 & \hat{a}_2 & \dots & \hat{a}_{n_a+1} \\ \hat{a}_2 & \hat{a}_3 & \dots & 0 \\ \hat{a}_3 & \hat{a}_4 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \hat{y}_{(k)} \\ \hat{y}_{(k-1)} \\ \vdots \\ \hat{y}_{(k-n_a)} \end{pmatrix} = \\ \begin{pmatrix} b_0 & 0 & \dots & 0 \\ b_1 & b_0 & \dots & 0 \\ b_2 & b_1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta u_{(k+1)} \\ \Delta u_{(k+2)} \\ \vdots \\ \Delta u_{(k+H_p)} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} b_1 & b_2 & \dots & b_{n_b} \\ b_2 & b_3 & \dots & 0 \\ b_3 & b_4 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta u_{(k-1)} \\ \Delta u_{(k-2)} \\ \vdots \\ \Delta u_{(k-n_b)} \end{pmatrix} \quad (\text{Eq. 5.15})$$

que pode ser escrita como:

$$C_A \hat{\mathcal{Y}} + H_A \mathcal{Y}^{old} = C_B \Delta \mathcal{U} + H_B \Delta \mathcal{U}^{old} \quad (\text{Eq. 5.16})$$

ou

$$\hat{\mathcal{Y}} = C_A^{-1} \{ C_B \Delta \mathcal{U} + H_B \Delta \mathcal{U}^{old} - H_A \mathcal{Y}^{old} \} \quad (\text{Eq. 5.17})$$

sendo: $\mathcal{G} = C_A^{-1} C_B$, $\mathcal{H}_1 = C_A^{-1} H_B$ e $\mathcal{H}_2 = C_A^{-1} H_A$, tem-se que:

$$\hat{\mathcal{Y}} = \mathcal{G} \Delta \mathcal{U} + \mathcal{H}_1 \Delta \mathcal{U}^{old} - \mathcal{H}_2 \mathcal{Y}^{old} \quad (\text{Eq. 5.18})$$

$$\text{com } \hat{\mathcal{Y}} = \begin{pmatrix} \hat{y}_{(k+1)} \\ \hat{y}_{(k+2)} \\ \vdots \\ \hat{y}_{(k+H_p)} \end{pmatrix}, \Delta \mathcal{U} = \begin{pmatrix} \Delta u_{(k)} \\ \Delta u_{(k+1)} \\ \vdots \\ \Delta u_{(k+H_c)} \end{pmatrix}, \mathcal{Y}^{old} = \begin{pmatrix} \hat{y}_{(k)} \\ \hat{y}_{(k-1)} \\ \vdots \\ \hat{y}_{(k-n_a)} \end{pmatrix} \text{ e } \Delta \mathcal{U}^{old} = \begin{pmatrix} \Delta u_{(k-1)} \\ \Delta u_{(k-2)} \\ \vdots \\ \Delta u_{(k+n_b)} \end{pmatrix}$$

Segundo Costa (2010), as aplicações de MPC são comumente definidas por funções objetivo que “penalizam” desvio entre valores preditos para a variável de saída em relação a uma trajetória de referência. Neste trabalho, utilizou-se, no algoritmo GPC, a função objetivo expressa pela Equação 5.19 onde H_p (horizonte de predição) e H_c (horizonte de controle) foram 10 e 5 respectivamente:

$$\text{argmin}_{\Delta \mathcal{U}} J_{MPC} = \sum_{k=H_w}^{H_p} (\hat{y}_{(k+j|k)} - y_{ref(k+j)})^2 + \lambda_u \sum_{k=1}^{H_c} \Delta u_{(k+j-1)}^2 \quad (\text{Eq. 5.19})$$

Na Equação 5.19, além do termo que “penaliza” o desvio entre a referência futura e os sinais de saída estimados pelo modelo de predição, há um termo que “penaliza”, por meio de uma sequência de pesos (λ_u), a variação brusca na variável manipulada. De acordo com Costa (2010), pode-se aplicar a sequência da função objetivo também para o desvio entre a referência e a saída da planta. Isto resulta em:

$$\text{argmin}_{\Delta u} J_{MPC} = \|\hat{y} - y^{ref}\|_{Q_y}^2 + \|\Delta u\|_{Q_u}^2 \quad (\text{Eq. 5.20})^{17}$$

onde: $y^{ref} \in \mathcal{R}^{H_p}$ é o vetor que indica a trajetória de referência futura do processo controlado; $Q_y \in \mathcal{R}^{H_p \times H_p}$ é uma matriz diagonal que “penaliza” o desvio da variável predita e $Q_u \in \mathcal{R}^{H_c \times H_c}$ uma matriz diagonal que “penaliza” a sequência de controle da variável manipulada. De acordo com Maciejowski (2001), a variável H_w indica o intervalo para qual serão aplicados as “penalidades” no desvio entre o sinal da planta e a referência $H_w \leq k \leq H_p$.

Os vetores y^{ref} , Q_y e Q_u são definidos como:

$$y^{ref} = \begin{pmatrix} y_{ref}(k) \\ \vdots \\ y_{ref}(k + H_p) \end{pmatrix}, Q_y = \begin{pmatrix} \lambda_u(1) & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & \lambda_u(H_p) \end{pmatrix} \text{ e } Q_u = \begin{pmatrix} \lambda_u(1) & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & \lambda_u(H_c) \end{pmatrix}$$

A otimização das funções objetivos do controle preditivo podem ou não apresentar restrições. Quando as funções não apresentam restrições (consideração esta adotada neste trabalho), o controlador tem solução analítica, podendo a variável de decisão Δu calculada explicitamente. Assim, o cálculo das ações do controlador GPC pode ser representado por (COSTA, 2010):

$$\Delta u = (\mathcal{G}^T Q_y G + Q_u)^{-1} \mathcal{G}^T Q_y (y^{ref} - y^{RL}) \quad (\text{Eq. 5.21})$$

sendo

$$kmpc = (\mathcal{G}^T Q_y G + Q_u)^{-1} \mathcal{G}^T Q_y \quad (\text{Eq. 5.22})$$

¹⁷ A notação $\| \cdot \|$ indica a norma euclidiana. Para um vetor X e matriz de pesos Q , tem-se: $\|X\|_Q = \sqrt{X^T Q X}$ e $\|X\|_Q^2 = X^T Q X$.

Assim, tem-se que:

$$\Delta u = kmpc (y^{ref} - y^{RL}) \quad (\text{Eq. 5.23})$$

$$\text{onde: } y^{RL} = \mathcal{H}_2 \mathcal{Y}^{old} - \mathcal{H}_1 \Delta \mathcal{U}^{old}$$

Como para cada modelo local (Regra *Fuzzy*) há o cálculo de um ganho para o controlador GPC, houve a necessidade de se ponderar os ganhos, $kmpc_i$. A saída do controlador é dada por:

$$\Delta u(k) = \begin{pmatrix} kmpc_{1(k)} \\ kmpc_{2(k)} \\ \vdots \\ kmpc_{l(k)} \end{pmatrix}^T \begin{pmatrix} \bar{w}_{1(k)} \\ \bar{w}_{2(k)} \\ \vdots \\ \bar{w}_{l(k)} \end{pmatrix} (y^{ref} - y^{RL}) \quad (\text{Eq. 5.24})$$

Assim,

$$u(k) = \Delta u(k) + u(k-1) \quad (\text{Eq. 5.25})$$

5.6.2 Modelos preditivos Takagi-Sugeno

Os modelos Takagi-Sugeno apresentados nas Tabelas 5.13 e 5.15 serão utilizados no GPC. Pode-se escrever os modelos TS na forma recursiva da seguinte maneira:

Para $RF^{(i)}$:

$$(1 - q_{i,4}k^{-1} - q_{i,5}k^{-2})y(k) = (q_{i,1} + q_{i,2}k^{-1} + q_{i,3}k^{-2})u(k) \quad (\text{Eq. 5.26})$$

onde $i=1,2,\dots,l$, sendo l o número de Regras *Fuzzy*.

A partir da Equação 5.26 e com o auxílio das Tabelas 5.13 e 5.15 tem-se que:

- *Modelo TS_{Te}^{FQ101} : predição da temperatura de evaporação em função da frequência do compressor:*

$$\begin{aligned} \text{RF}^{(1)}: \quad & y(k) + 43.019 \times 10^{-2} y(k-1) + 16.741 \times 10^{-2} y(k-2) = -78.335 \times 10^{-2} u(k) \dots \\ & + 149.827 \times 10^{-2} u(k-1) - 43.019 \times 10^{-2} u(k-2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{RF}^{(2)}: \quad & y(k) - 55.925 \times 10^{-2} y(k-1) - 41.310 \times 10^{-2} y(k-2) = -0.700 \times 10^{-2} u(k) \dots \\ & - 1.803 \times 10^{-2} u(k-1) + 1.835 \times 10^{-2} u(k-2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{RF}^{(3)}: \quad & y(k) - 22.549 \times 10^{-2} y(k-1) - 53.374 \times 10^{-2} y(k-2) = 28.937 \times 10^{-2} u(k) \dots \\ & - 90.367 \times 10^{-2} u(k-1) + 72.283 \times 10^{-2} u(k-2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{RF}^{(4)}: \quad & y(k) - 155.741 \times 10^{-2} y(k-1) + 58.552 \times 10^{-2} y(k-2) = -0.883 \times 10^{-2} u(k) \dots \\ & + 1.081 \times 10^{-2} u(k-1) - 0.104 \times 10^{-2} u(k-2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{RF}^{(5)}: \quad & y(k) - 104.013 \times 10^{-2} y(k-1) + 3.890 \times 10^{-2} y(k-2) = 1.537 \times 10^{-2} u(k) \dots \\ & - 4.108 \times 10^{-2} u(k-1) + 2.557 \times 10^{-2} u(k-2) \end{aligned}$$

- *Modelo TS_{Tp}^{FQ101} : predição da temperatura do propilenoglicol em função da frequência do compressor:*

$$\begin{aligned} \text{RF}^{(1)}: \quad & y(k) - 33.879 \times 10^{-2} y(k-1) + 3.511 \times 10^{-2} y(k-2) = 0.862 \times 10^{-2} u(k) \dots \\ & - 0.707 \times 10^{-2} u(k-1) + 67.201 \times 10^{-2} u(k-2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{RF}^{(2)}: \quad & y(k) - 9.138 \times 10^{-2} y(k-1) - 0.192 \times 10^{-2} y(k-2) = -0.009 \times 10^{-2} u(k) \dots \\ & - 0.055 \times 10^{-2} u(k-1) + 90.764 \times 10^{-2} u(k-2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{RF}^{(3)}: \quad & y(k) + 22.348 \times 10^{-2} y(k-1) - 29.338 \times 10^{-2} y(k-2) = -0.547 \times 10^{-2} u(k) \dots \\ & + 0.892 \times 10^{-2} u(k-1) + 103.053 \times 10^{-2} u(k-2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{RF}^{(4)}: \quad & y(k) - 20.249 \times 10^{-2} y(k-1) - 8.436 \times 10^{-2} y(k-2) = -0.047 \times 10^{-2} u(k) \dots \\ & - 0.729 \times 10^{-2} u(k-1) + 75.875 \times 10^{-2} u(k-2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{RF}^{(5)}: \quad & y(k) + 2.576 \times 10^{-2} y(k-1) - 13.195 \times 10^{-2} y(k-2) = -0.189 \times 10^{-2} u(k) \dots \\ & - 0.057 \times 10^{-2} u(k-1) + 94.477 \times 10^{-2} u(k-2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{RF}^{(6)}: \quad & y(k) + 288.439 \times 10^{-2} y(k-1) - 78.671 \times 10^{-2} y(k-2) = -49.351 \times 10^{-2} u(k) \dots \\ & + 51.434 \times 10^{-2} u(k-1) + 300.506 \times 10^{-2} u(k-2) \end{aligned}$$

- *Modelo TS_{Te}^{F201} : predição da temperatura de evaporação em função da frequência da bomba do evaporador:*

$$\begin{aligned} \text{RF}^{(1)}: \quad & y(k) - 135.768 \times 10^{-2} y(k-1) + 37.751 \times 10^{-2} y(k-2) = -0.344 \times 10^{-2} u(k) \dots \\ & + 0.411 \times 10^{-2} u(k-1) - 1.114 \times 10^{-2} u(k-2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{RF}^{(2)}: \quad & y(k) - 136.521 \times 10^{-2} y(k-1) + 38.509 \times 10^{-2} y(k-2) = 0.100 \times 10^{-2} u(k) \dots \\ & - 0.954 \times 10^{-2} u(k-1) - 0.367 \times 10^{-2} u(k-2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{RF}^{(3)}: \quad & y(k) - 196.748 \times 10^{-2} y(k-1) + 100.485 \times 10^{-2} y(k-2) = -1.905 \times 10^{-2} u(k) \dots \\ & + 0.799 \times 10^{-2} u(k-1) - 0.053 \times 10^{-2} u(k-2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{RF}^{(4)}: \quad & y(k) - 178.909 \times 10^{-2} y(k-1) + 81.798 \times 10^{-2} y(k-2) = -0.188 \times 10^{-2} u(k) \dots \\ & - 21.936 \times 10^{-2} u(k-1) + 21.003 \times 10^{-2} u(k-2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{RF}^{(5)}: \quad & y(k) - 206.312 \times 10^{-2} y(k-1) + 107.262 \times 10^{-2} y(k-2) = 0.585 \times 10^{-2} u(k) \dots \\ & - 0.937 \times 10^{-2} u(k-1) - 0.363 \times 10^{-2} u(k-2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{RF}^{(6)}: \quad & y(k) - 132.432 \times 10^{-2} y(k-1) + 28.845 \times 10^{-2} y(k-2) = 0.015 \times 10^{-2} u(k) \dots \\ & + 0.511 \times 10^{-2} u(k-1) - 0.058 \times 10^{-2} u(k-2) \end{aligned}$$

- *Modelo TS_{Tp}^{F201} : para predição da temperatura do propilenoglicol em função da frequência da bomba do evaporador:*

$$\begin{aligned} \text{RF}^{(1)}: \quad & y(k) - 180.476 \times 10^{-2} y(k-1) + 78.848 \times 10^{-2} y(k-2) = 2.819 \times 10^{-2} u(k) \dots \\ & + 0.402 \times 10^{-2} u(k-1) - 0.262 \times 10^{-2} u(k-2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{RF}^{(2)}: \quad & y(k) - 160.586 \times 10^{-2} y(k-1) + 60.571 \times 10^{-2} y(k-2) = 5.764 \times 10^{-2} u(k) \dots \\ & - 5.118 \times 10^{-2} u(k-1) - 1.623 \times 10^{-2} u(k-2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{RF}^{(3)}: \quad & y(k) - 110.681 \times 10^{-2} y(k-1) + 11.787 \times 10^{-2} y(k-2) = 0.974 \times 10^{-2} u(k) \dots \\ & - 0.993 \times 10^{-2} u(k-1) + 0.025 \times 10^{-2} u(k-2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{RF}^{(4)}: \quad & y(k) - 147.972 \times 10^{-2} y(k-1) + 51.965 \times 10^{-2} y(k-2) = -0.286 \times 10^{-2} u(k) \dots \\ & + 3.419 \times 10^{-2} u(k-1) - 5.034 \times 10^{-2} u(k-2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{RF}^{(5)}: \quad & y(k) - 154.106 \times 10^{-2} y(k-1) + 53.802 \times 10^{-2} y(k-2) = 0.171 \times 10^{-2} u(k) \dots \\ & - 0.272 \times 10^{-2} u(k-1) - 1.751 \times 10^{-2} u(k-2) \end{aligned}$$

5.6.3 Implementação do controlador GPC no Matlab/Simulink®

Toda estratégia de controle descrita na seção 5.6.2 foi implementada no Matlab/Simulink®. Foram implementados os modelos TS_{Te}^{F101} , TS_{Tp}^{F101} e TS_{Tp}^{F201} . O modelo TS_{Te}^{F201} não foi implementado pois, verificando-se as Figuras 5.42 e 5.43, notou-se que ao se perturbar o sistema variando a frequência da bomba do evaporador o estado estacionário da temperatura de evaporação permanece sempre o mesmo, assim, um controle da temperatura de evaporação manipulando-se a frequência do compressor não seria justificada. A Figura 5.71, exemplifica, a implementação do controlador GPC utilizando como modelo preditivo o modelo TS_{Tp}^{F101} .

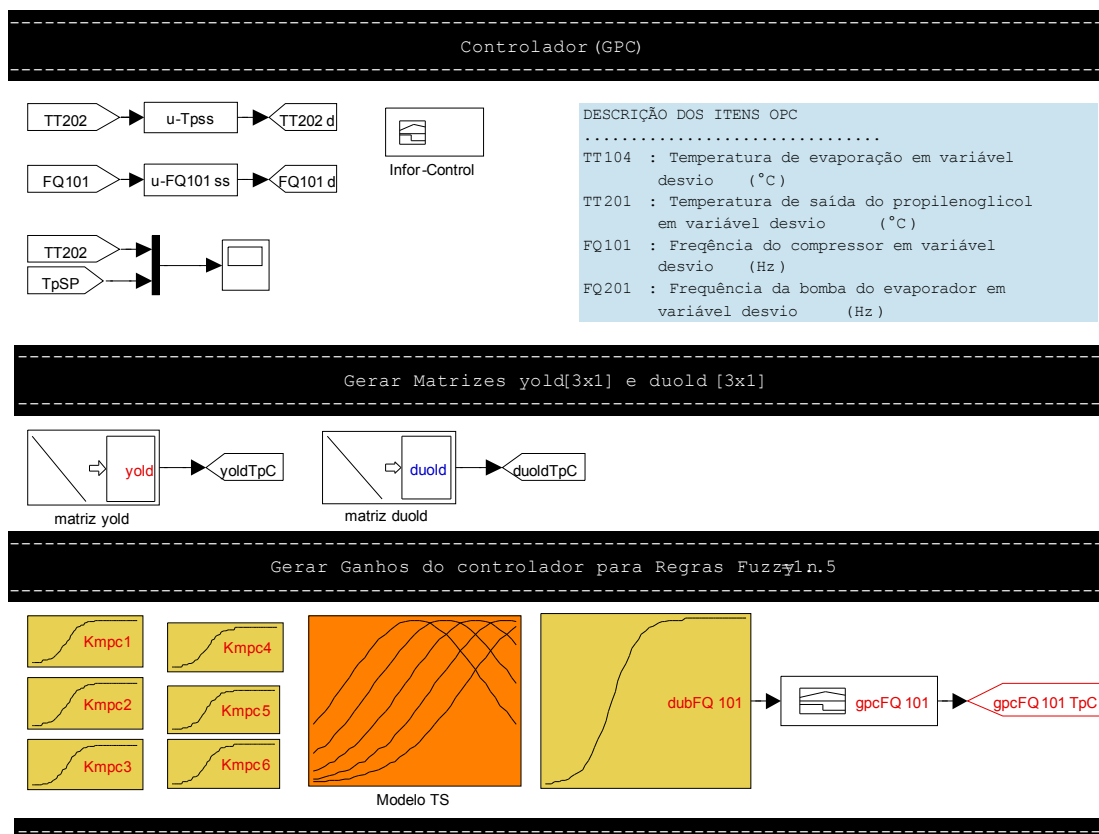


Figura 5. 71 – Implementação do controlador GPC

A Figura 5.72 representa o cálculo das matrizes y^{old} e Δu^{old} , utilizadas na Equação 5.23.

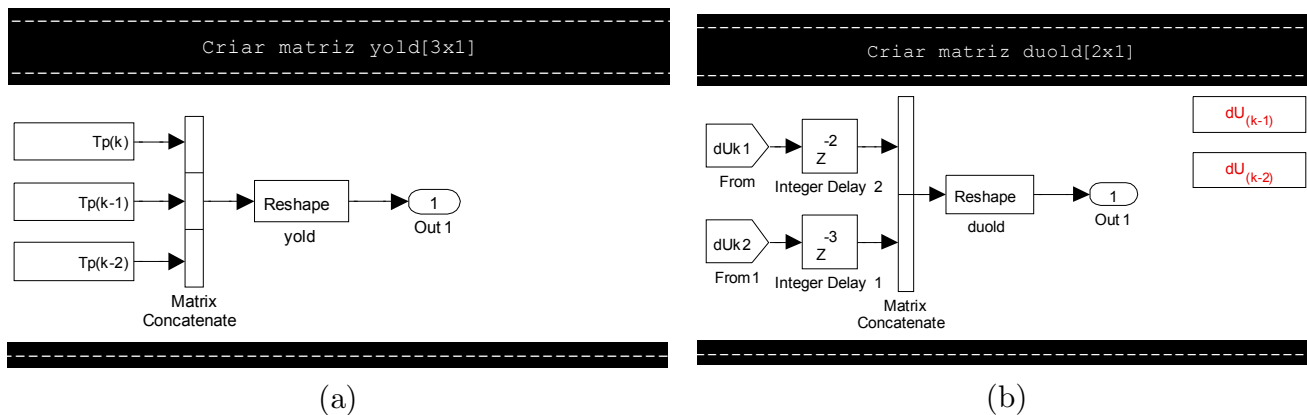


Figura 5. 72 – Calculo das matrizes: (a) y^{old} ; (b) Δu^{old}

Para cada modelo local (Regra *Fuzzy*) que compõe o modelo implementado, foi calculado um ganho, $kmpc$. O ganho para o modelo local representado pela $RF^{(1)}$, $kmpc1$, por exemplo, é representado na Figura 5.73.

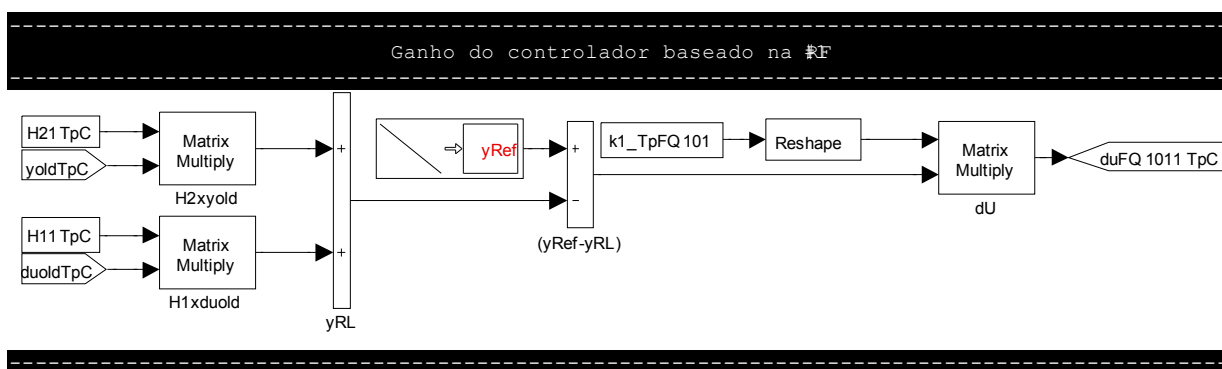


Figura 5. 73 – Cálculo do ganho do controlador $kmpc$

As Regras *Fuzzy* para o modelo TS_{Tp}^{F101} são representadas na Figura 5.74.

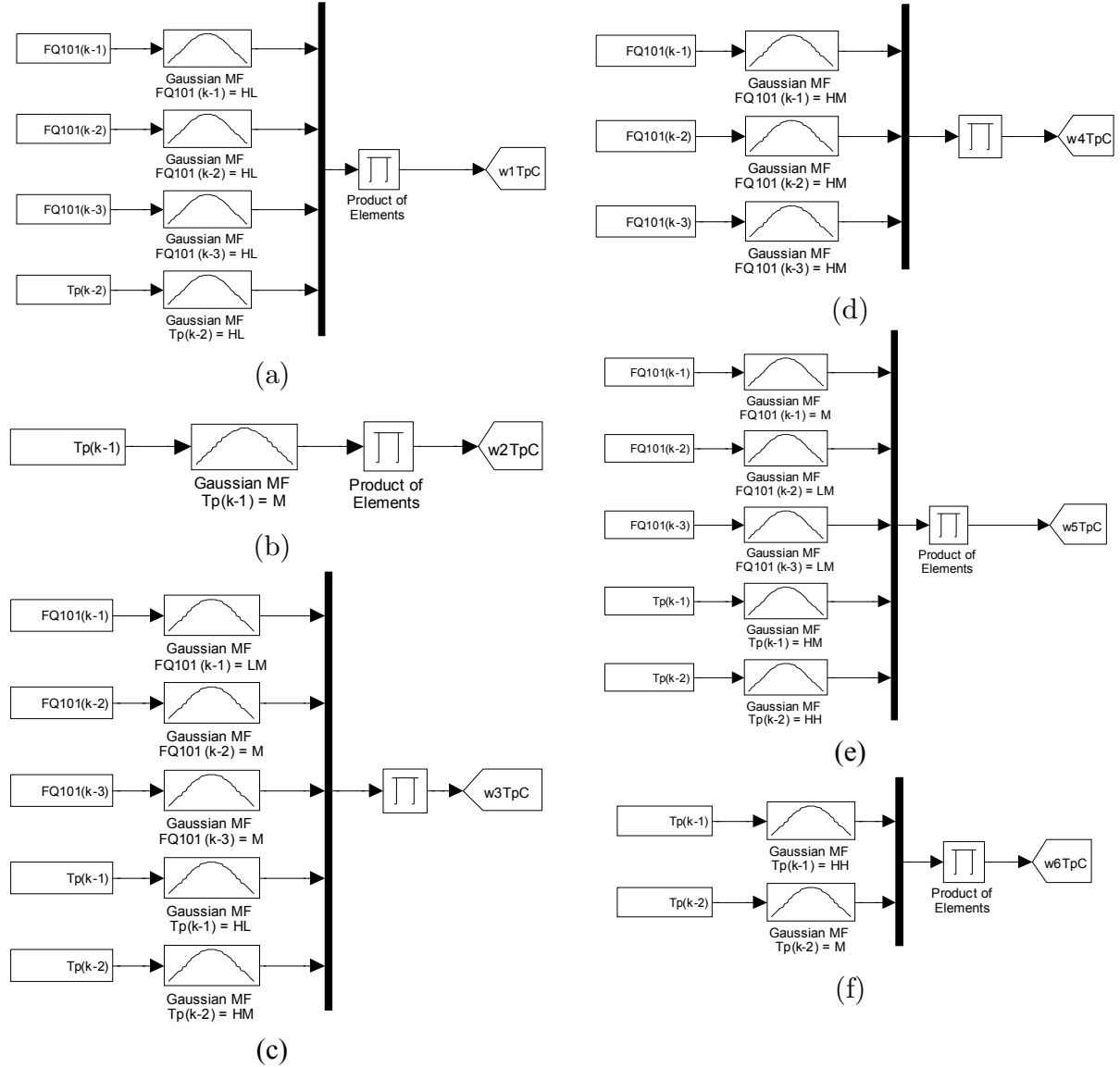


Figura 5. 74 – Implementação do modelo TS_{Tp}^{F101} : (a) Regra *Fuzzy* 1; (b) Regra *Fuzzy* 2; (c) Regra *Fuzzy* 3; (d) Regra *Fuzzy* 4; (e) Regra *Fuzzy* 5; (f) Regra *Fuzzy* 6

5.6.4 Resultados obtidos na implementação do controle GPC

A ideia principal deste trabalho foi a utilização de Modelos Takagi-Sugeno como um modelo de predição em controladores MPC. Como descrito anteriormente, a estratégia de controle foi baseada em um Controlador Preditivo Generalizado (GPC) sem restrições na função objetivo que definem as ações de controle. Para os testes dos controladores GPC foram realizados três ensaios distintos, conforme descrito na Tabela 5.17.

Tabela 5. 17 – Ensaios para teste da utilização do controlador GPC utilizando como modelo preditivo um modelo Takagi-Sugeno

Controle	Variável Controlada	Variável Manipulada	Modelo TS utilizado
GPC1	Te	FQ101	Modelo TS _{Te} ^{FQ101}
GPC2	Tp	FQ101	Modelo TS _{Tp} ^{FQ101}
GPC3	Tp	FQ201	Modelo TS _{Tp} ^{FQ201}
Te: Temperatura de evaporação; Tp: Temperatura do propilenoglicol; FQ101: Frequência do compressor; FQ201: Frequência da bomba do evaporador			

Um problema encontrado neste trabalho foi o limite de saturação da variável manipulada *FQ101* (frequência do compressor). Os limites máximos e mínimos da variável *FQ101* foram 70 Hz e 50 Hz, respectivamente, limitando assim a atuação do compressor no sistema de refrigeração. Com isto, a mudança de set-point no processo ficou limitada em, aproximadamente, ± 1 °C.

5.6.4.1 Controlador GPC para controle da temperatura de evaporação manipulando a frequência da bomba do evaporador

Os resultados obtidos para o controle da temperatura de evaporação tendo como variável manipulada a frequência do compressor utilizando o modelo TS_{Te}^{FQ101} e carga térmica de 3000 W são apresentados na Figura 5.75 e 5.76.

Analisando a Figura 5.75, verifica-se o desempenho no rastreamento do *set-point* do controlador GPC1. Observa-se também um bom desempenho para mudanças na referência do controlador.

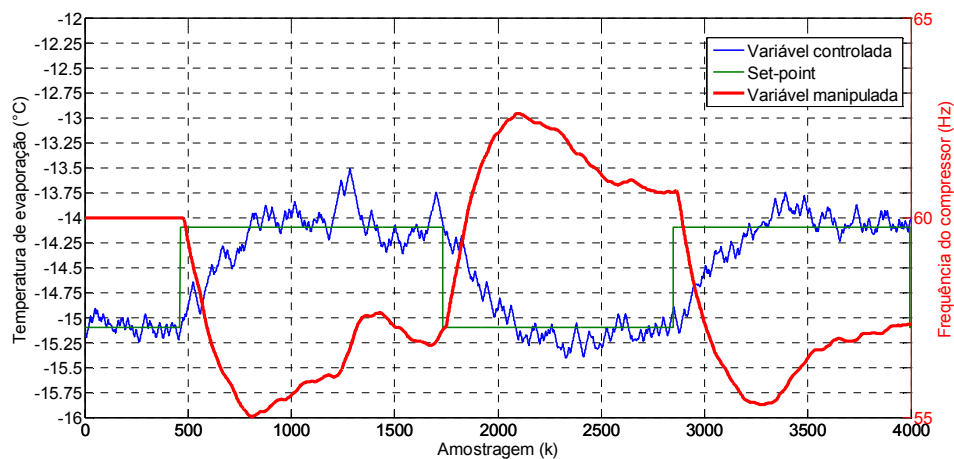


Figura 5. 75 – rastreamento do set-point da temperatura de evaporação do controlador GPC1

Na Figura 5.76 é apresentada a contribuição de cada modelo local (RF) no controle GPC1. Nota-se que o modelo local que mais atua no controle é o modelo representado pela Regra *Fuzzy* 4 do modelo TS_{Te}^{FQ101} , seguindo pelo modelo local representado pela Regra *Fuzzy* 5, contribuindo pouco as demais Regras *Fuzzy*.

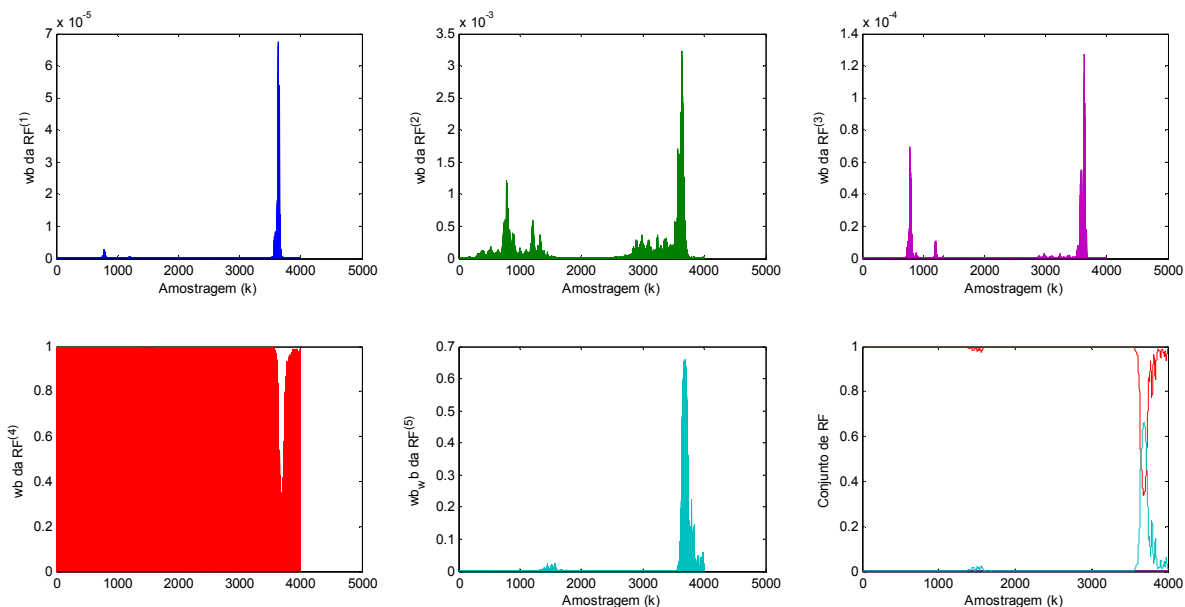


Figura 5. 76 – Contribuição das Regras *Fuzzy* no controlador GPC1 durante o rastreamento do set-point da temperatura de evaporação

5.6.4.2 Controlador GPC para controle da temperatura do propilenoglicol manipulando a frequência do compressor

Nas Figuras 5.77 e 5.78 são apresentados os resultados obtidos para o controle da temperatura do propilenoglicol, tendo como variável manipulada a frequência do compressor, utilizando o modelo TS_{Tp}^{FQ101} .

Verifica-se na Figura 5.77 o desempenho no rastreamento do *set-point* do controlador GPC2 e pode-se, também, observar um bom desempenho para mudanças na referência do controlador.

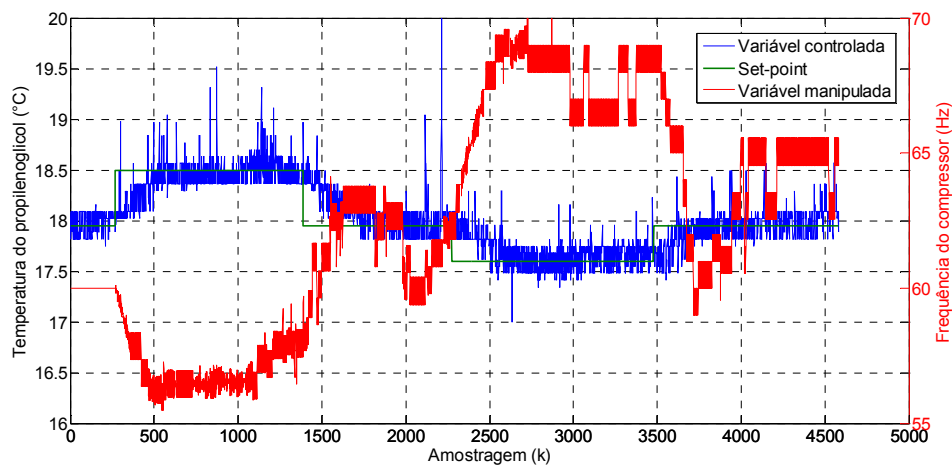


Figura 5. 77 – Rastreamento do set-point da temperatura do propilenoglicol do controlador GPC2

A contribuição de cada modelo local (RF) no controle GPC2 pode ser observada na Figura 5.79. Nota-se que o modelo local que mais atua no controle são os modelos representados pelas Regras *Fuzzy* 4 e 5 do modelo TS_{Tp}^{FQ101} .

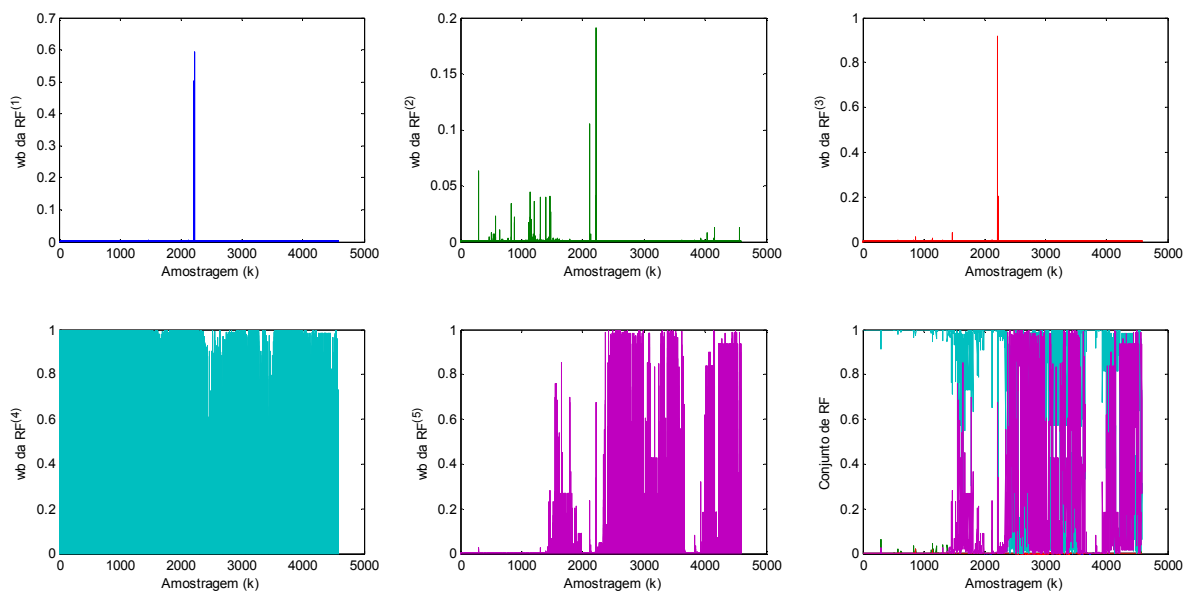


Figura 5. 78 – Contribuição das Regras *Fuzzy* no controlador GPC1 durante o rastreamento do set-point da temperatura de evaporação

5.6.4.3 Controlador GPC para controle da temperatura do propilenoglicol manipulando a frequência do compressor

Os resultados obtidos para o controle da temperatura do propilenoglicol tendo como variável manipulada a frequência da bomba do evaporador, utilizando o modelo TS_{Tp}^{FQ201} , são apresentados na Figura 5.79 e 5.80.

Além da limitação da frequência do compressor, citada anteriormente, ocorreu também um problema com o servidor OPC do *Indusoft* (o que realiza a conexão entre o Matlab/Simulink® e a planta). Este problema acarretou uma perda de sinal de alguns sensores. Analisando a Figura 5.79, observa-se alguns picos na variável controlada (variável medida) causada pela perda de sinal. Uma solução paliativa foi adicionar um filtro “*noise-spike*”¹⁸ (SEBORG, 1999) para descartar os picos. Porém, quanto havia a perda de sinal, o valor da variável medida atingia valores na grandeza de 10^{30} (característica do *Indusoft*), fazendo com que, mesmo com o filtro “*noise-spike*”, a variável apresentasse picos em sua leitura.

Mesmo com o problema da perda de sinal, observa-se na Figura 5.79, que o desempenho no rastreamento do *set-point* da temperatura do propilenoglicol do controlador GPC3 não foi “ruim”, houve o controle da temperatura do propilenoglicol.

¹⁸ Filtro *Noise-Spike*: $y_{F(k)} = \begin{cases} y_{m(k)} & \text{if } (|y_{m(k)} - y_{m(k-1)}| \leq \Delta y) \\ y_{F(k-1)} - \Delta y & \text{if } (y_{F(k-1)} - y_{m(k)}) > \Delta y \\ y_{F(k-1)} + \Delta y & \text{if } (y_{m(k)} - y_{F(k-1)}) > \Delta y \end{cases}$, onde: y_m é a variável medida, y_F é a variável

filtrada e Δy o incremento de análise da variável.

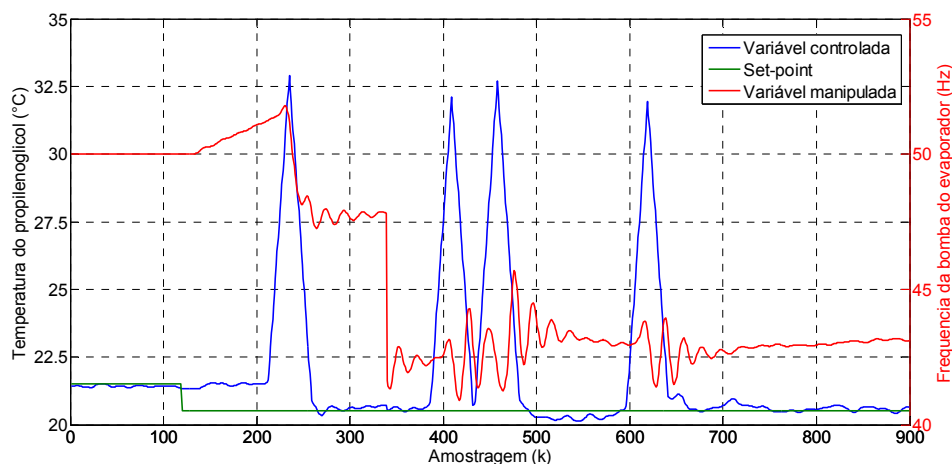


Figura 5. 79 – Rastreamento do set-point da temperatura do propilenoglicol do controlador GPC3

Na Figura 5.80, é apresentada a contribuição de cada modelo local (RF) no controle GPC3. Nota-se que todos os modelos locais influenciam no controlador, sendo o modelo representado pela Regra *Fuzzy* 4 do modelo TS_{Tp}^{FQ201} a mais atuante.

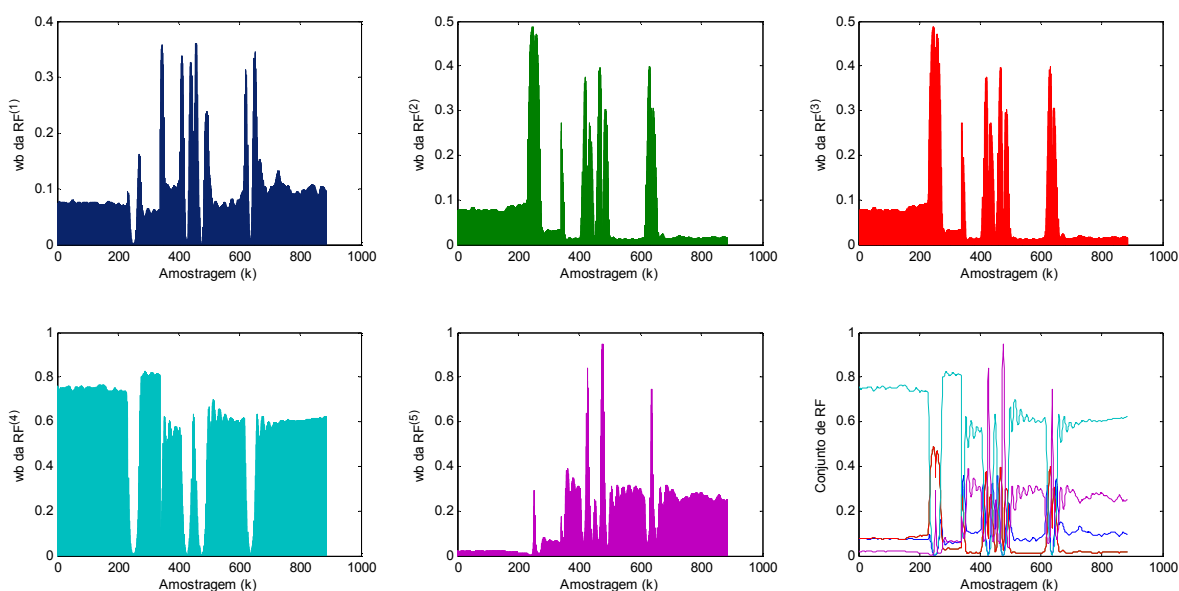


Figura 5. 80 - Contribuição das Regras *Fuzzy* no controlador GPC1 durante o rastreamento do set-point da temperatura de evaporação

6. Conclusões e Trabalhos Futuros

6.1 Conclusões

Fazendo uma análise passo-a-passo de todos os resultados obtidos pode-se concluir que:

- As melhorias realizadas no sistema de refrigeração contribuíram para um melhora na parte de supervisão e aquisição de dados contudo, a substituição do compressor aberto pelo compressor semi-hermético limitou a variação da frequência entre 50 e 70 Hz ocasionando um efeito não muito significativo no sistema;
- A comunicação OPC é uma ótima alternativa para se desenvolver sistemas supervisórios utilizando de ferramentas não convencionais, como um *software* matemático pois, a comunicação MATLAB/SIMULINK®-CLP apresentou 0,35 s de “*Pseudo Real-Time*” (tempo necessário para o software enviar e receber as informações do CLP). O MATLAB/SIMULINK® mostrou-se um ótimo meio de se supervisionar e consequentemente controlar o sistema de refrigeração visto as possibilidades de cálculos que se pode realizar com sua utilização;
- A análise da dinâmica do sistema demonstra que perturbações na FQ101 de ± 10 Hz acarretaram uma variação, em média, de aproximadamente 4 °C na temperatura de evaporação e 3°C na temperatura do propilenoglicol. Ao se promover perturbações na FQ201 de ± 10 Hz observou-se uma

- variação média de aproximadamente 4 °C. na temperatura do propilenoglicol e manteve inalterada a temperatura de evaporação;
- Os modelos Takagi-Sugeno identificados utilizando-se a técnica ANFIS apresentaram um bom desempenho em suas predições o que foi confirmado pelas validações e pelos cálculos do VAF. Os modelos Takagi-Sugeno para a predição da temperatura de evaporação e do propilenoglicol em função da variação da frequência do compressor, TS_{Te}^{FQ101} e TS_{Tp}^{FQ101} , apresentaram VAF igual a 99,78% e 98,83% respectivamente. Para a predição das temperaturas de evaporação e do propilenoglicol em função da variação da frequência da bomba do evaporador, os modelos TS_{Te}^{FQ201} e TS_{Tp}^{FQ201} apresentaram, respectivamente, VAF igual a 99,96% e 99,94%;
 - Como os modelos Takagi-Sugeno apresentaram bom desempenho, os mesmos, foram utilizados como modelos preditivos em MPC, mais especificamente, em GPC. Os controladores GPC1, GPC2 e GPC3 desenvolvidos apresentaram bom desempenho no rastreamento do *set-point* do processo de refrigeração. Os melhores desempenhos foram apresentados pelos controladores GPC1 e GPC2 ficando a variável controlada, dos respectivos controladores, em torno de $\pm 0,3$ °C do set-point. No caso do controlador GPC3, a perda de sinal, citada anteriormente, influenciou na ação do controlador, contudo, o controlador conseguiu rastrear a mudança de referência da variável controlada. As mudanças de set-point foram de ± 1 °C;

- O sistema de monitoramento e controle desenvolvido (SISMOCAR) é uma potente ferramenta que pode ser utilizada em outros sistemas de refrigeração mudando apenas o modelo de identificação;
- Um sistema de refrigeração onde a variável manipulada não apresente limitações melhora o desempenho dos controladores GPC.

6.2 Trabalhos futuros

Este trabalho mostrou o grande potencial da utilização de modelos Takagi-Sugeno como modelos preditivos para controle de modelo preditivo (MPC), porém algumas dificuldades foram encontradas ao decorrer do desenvolvimento do trabalho que afetaram os resultados. Assim algumas sugestões são relacionadas a fim de proporcionar bons resultados futuros.

Sugestões quanto ao sistema de refrigeração:

- Realizar a troca do compressor para que a faixa de manipulação do mesmo seja maior que a atual (20 Hz);
- Promover a instalação de uma válvula de expansão eletrônica (VEE) a fim de controlar o superaquecimento do ciclo de refrigeração, variável esta muito importante para o desempenho do ciclo e consequentemente no consumo de energia;
- Promover a instalação de sensores de umidade relativa e temperatura na torre de resfriamento utilizada no processo de condensação a água.

Sugestões quanto à comunicação entre sistema de supervisão e sistema de refrigeração:

- Devido ao fato da frequência de perda de dados pelo servidor OPC utilizado, sugere-se buscar um servidor OPC alternativo ou até mesmo a criação de um servidor OPC próprio por meio de linguagens de programação (Ex: C⁺⁺).

Sugestões quanto a identificação do sistema:

- Adicionar, na identificação, o efeito da umidade relativa na torre de resfriamento;
- Adicionar, na identificação, o efeito de uma carga térmica variável.

Sugestões quanto a implementação do controle:

- Desenvolver modelos Takagi-Sugeno MIMO (*Multi-Input Multi-Output*) para serem utilizados em MPC com restrições na função objetivo da ação de controle realizando a otimização on-line;
- Analisar novos horizonte de predição (H_p) e novos horizontes de controle (H_c) e também analisar as trajetórias da ação de controle;
- Realizar um comparativo entre os controladores GPC desenvolvido e controladores convencionais como PID focando o consumo de energia e a melhoria do coeficiente de performance (COP).

7. Referências Bibliográficas

AGUIRRE, L. A. (2000). *Introdução à identificação de sistemas: técnicas lineares e não-lineares aplicadas a sistemas reais*. Belo Horizonte: UFMG.

APREA, C.; MASTRULLO, R.; RENNO, C. (2004). *Fuzzy control of the compressor speed in a refrigeration plant*. 27, pp. 639-648.

BABUSKA, R.; ROUBOS, J. A.; VER-BRUGGEN, H. B. (1998). *Identification of MIMO systems by input-output TS fuzzy models*. Proceedings of IEE Word Congress on Computational Intelligence and Fuzzy System, Anchorage, USA, pp. 657-662.

BEGHI, A.; CECCHINATO, L.; RAMPAZZO, M. (2011). *On-line, auto-tuning control of Electronic Expansion Valves*. International Journal of Refrigeration, 34, pp. 1151-1161.

BURACAS, G. T.; BOYNTON, G. M. (2002). *Efficient Design of Event-Related fMRI Experiments Using M-Sequences*. NeuroImage, 16, pp. 801-813.

BUZELIN, L. O.; AMICO, S. C.; VARGAS, J. V.; PARISE, J. A. (2005). *Experimental development of an intelligent refrigeration system*. International Journal of Refrigeration, 28(2), pp. 165-175.

CARDOSO, M. C.; e ZANAROTTI, G. S. (2005). *Evolução e tendências*. Mecatrônica Atual – Automação Industrial de Processos e Manufatura, 4(25), pp. 17-21.

CHANGENET, C.; CHARVET, J.; GÉHIN, D.;CHARMEL, B. (2008). *Study on predictive functional control of an expansion valve for controlling the evaporator superheat*. Journal Systems and Control Engineering, 222(Part I), pp. 571-582.

CLARKE, D.; MOHTADI, C.; TUFFS, P. (1987). *Generalized predictive control. Part 1: The basic algorithm. Part 2: Extensions and interpretations*. Automatica, 23(2), pp. 137-160.

COSTA, T. V. (2010). *Controle preditivo baseado em rede de modelos lineares locais aplicado a um reator de neutralização*. Campinas, Faculdade de Engenharia Química, UNICAMP, 134 pp, Dissertação de Mestrado.

DALL'AGNOL, M. (2010). *Aplicação de controladores feedback em sistema experimental de refrigeração e desenvolvimento de modelo preditivo baseado em redes neurais*. Campinas, Faculdade de Engenharia Química, UNICAMP, 101 pp, Dissertação de Mestrado.

EKREN, O.; SAHIN, S.; ISLER, Y. (2010). *Comparison of different controllers for variable speed compressor and electronic expansion valve*. International Journal of Refrigeration, 33, pp. 1161-1168.

ELLIOTT, M.; RASMUSSEN, P. (2010). *On reducing evaporator superheat nonlinearity with control architecture*. International Journal of Refrigeration, 33, pp. 607-614.

ESCAÑO, J.; BORDONS, C.; VILAS, C.; GARCÍA, M.; ALONSO, A. (2009). *Neurofuzzy model based predictive control for thermal batch processes*. Journal of Process Control, 19, pp. 1566-1575.

- FALLAHSOHI, C.; CHANGENET, C.; PLACÉ, S.; LIGERET, C.; LIN-SHI, X. (2010). *Predictive functional control of an expansion valve for minimizing the superheat of an evaporator*. International Journal of Refrigeration, 33, pp. 409-418.
- FONSECA, M. O. (2002). *Comunicação OPC – uma abordagem*. In: VI Seminário de Automação de Processos, Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, pp. 1-12. Vitoria,ES.
- HARRIS, C. J.; MOORE, C. G.; e BROWN, M. (1993). *Intelligent Control: Aspects of Fuzzy Logic and Neural Nets*. Singapura: World Scientific Co. 380 pp.
- HAYKIN, S. S. (2001). *Redes Neurais - Princípio e Prática*. Bookman. 896 pp.
- JABARDO, J. M.; MAMANI, W. G.; IANELLA, M. R. (2002). *Modeling and experimental evaluation of an automotive air conditioning system with a variable capacity compressor*. International Journal of Refrigeration, 25, pp. 1157-1172.
- JANG, J. S. (1993). *ANFIS: adaptive network based fuzzy inference system*. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 23(3), pp. 665-685.
- JANG, J. S.; SUN, C. T. (1995). *Neuro-fuzzy modeling and control*. Proceedings of the IEEE, 3, pp. 378-406.
- KOURY, R. N.; MACHADO, L; ISMAIL, K. .(2001). *Numerical simulation of a variable speed refrigeration system*. International Journal of Refrigeration, 24(4), pp. 192-200.
- LEDUCQ, D.; GUILPART, J.; TRYSTRAM, G. (2006). *Non-linear predictive control of a vapour compression cycle*. International Journal of Refrigeration, 29, pp. 761-772.

- LEE, C. (1990). *Fuzzy logic in control systems: fuzzy logic controller - Part I*. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 20(2), pp. 404-418.
- LENARDUZZI, F. J.; YAP, S. S. (1998). *Measuring the Performance of a Variable-Speed Drive Retrofit on a Fixed-Speed Centrifugal Chiller*. ASHRAE Transaction, 104(parte 2), pp. 658-657.
- LI, N.; LI, S. Y.; XI, Y. G. (2004). *Multi-model predictive control based on the Takagi-Sugeno fuzzy models: a case study*. Information Sciences, 165, pp. 247-263.
- LIMA, F. (2010). *Estimador Neuro-Fuzzy de Velocidade aplicado ao controle vetorial sem Sensores de Motores de Indução Trifásico*. São Paulo, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 145 pp. Tese de Doutorado.
- MACIEJOWSKI, J. (2001). *Predictive control with constraints*. London: Prentice Hall.
- MACIEL, P. H. (2003). *Configuração de OPC Client no Elipse E3. RT 010.03 – Criado: 10.09.2003 – Atualizado: 11.09.2003*. Acesso em 4 de 2007, disponível em <http://www.elipse.com.br/download/artigos/rt010.03.pdf>.
- MANSKE, K. A.; REINDL, D. T.; KLEIN, S. A. (2001). *Evaporative Condenser Control in Industrial Refrigeration Systems*. International Journal of refrigeration, 24(7), pp. 679-691.
- MELENDEZ, W. A.; PETERSEN, E. L. (1999). *The upper layers of the ISO OSI reference model (Part II)*. Computer Standards e Interfaces, 20, pp. 185-199.

- NANAYAKKARA, V. K.; IKEGAMI, Y.; UEHARA, H. (2002). *Evolutionary design of dynamic neural networks for evaporator control*. International Journal of Refrigeration, 25, pp. 813-826.
- NAVARRO-ESBRÍ, J.; BERBEGALL, V.; VERDU, G.; CABELLO, R.; LLOPIS, R. (2007). *A low data requirement model of a variable-speed vapour compression refrigeration system based on neural networks*. International Journal of Refrigeration, 30(8), pp. 1442-1459.
- PAIVA, R.; DOURADO, A. (2004). *Interpretability and learning in neuro-fuzzy systems*. Fuzzy Sets and Systems, 141, pp. 17-38.
- PINELLI, T. G. (2008). *Automação e análise do consumo de energia de um sistema de refrigeração para resfriamento de líquido*. Campinas, Faculdade de Engenharia Química, UNICAMP, 84 pp. Dissertação de Mestrado.
- ROSSITER, J. (2003). *Model-based predictive control: A Practical Approach*. Florida: CRC Press, Control Series.
- SAITO, K.; CAMPOS, M. N. (2004). *Sistemas Inteligentes em Controle e Automação de Processos*. Rio de Janeiro: Ciência Moderna. 235 pp.
- SHAW, I.; SIMÕES, M. (1999). *Controle e modelagem fuzzy*. São Paulo: Edgard Blücher. 200 pp.
- SIMULINK, M. e. (2004-2007). *OPC Toolbox™ 2 - User's guide*. The MathWorks™.

SKRJANC, I.; MATKO, D. (2000). *Predictive functional control based on fuzzy model for heat-exchanger pilot plant*. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 8(6), pp. 705-712.

SOUSA, J.; KAYMAK, U. (2001). *Model predictive control using fuzzy decision functions*. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 31(1).

SOUSA, J.; BABUSKA, R.; VERBRUGGEN, H. (1997). *Fuzzy predictive control applied to an air-conditioning system*. Control Engineering Practice, 5(10), pp. 1395-1406.

SOUZA, L. C.; SEIXAS FILHO, C.; PENA, R. T. (1998). *Padrão de acesso a dados OPC e sua implementação em um driver OPC-Modbus*. In: II Congresso Mineiro de Automação, V Simpósio Regional de Instrumentação da ISA-BH/GRINST-MG, pp. 157-164. Belo Horizonte-MG.

TASSOU, S.; e QURESHI, T. (1998). *Comparative performance evaluation of positive displacement compressors in variable-speed refrigeration applications*. International Journal of Refrigeration, 21(1), pp. 29-41.

VARGAS-LARA, J. M. (2005). *Identificação de modelos para controle preditivo: aplicação a uma planta de lodos ativados*. Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica, UNICAMP. 187 pp. Tese de Doutorado.

VARGAS, J. V.; HORUZ, I., S. C. T.; FLEMING, J. S.; PARISE, J. (1998). *Simulation of the transient response of heat*. International Journal of Refrigeration, 24(8), pp. 648-660.

WANG, H.; TANAKA, K.; GRIFFIN, M. (1996). *An approach to fuzzy control of nonlinear system: stability and design issues*. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 4(1), pp. 14-23.

ZHU, Y. C. (1993). *Identification of Multivariable Industrial Processes: For Simulation, Diagnosis and Control*. London: Springer-Verlag. 187 pp.

APÊNDICE A: Cálculos *on-line* realizados no SISMOCAR

Como citado na *seção* anterior, no grupo de cálculos *on-line*, foram realizados cálculos em tempo real para algumas variáveis de fundamental importância no ciclo de refrigeração.

Devido a ausência de medidores de vazões mássicas foram criados “instrumentos virtuais” para a realização dos cálculos das vazões mássicas de R22 ($\dot{m}_{R22}$) e de propilenoglicol ($\dot{m}_p$). As Equações A.1 e A.2 representam respectivamente as vazões mássicas de R22 e propilenoglicol.

$$\dot{m}_{R22} = FT_{R22} \times \rho_{R22} \quad (\text{Eq. A.1})$$

Sendo: $\rho_{R22} = (1/v_{R22}) \times 1000$. A multiplicação por (1000) corresponde à transformação de unidade de medida, da densidade, de $kg \cdot dm^{-3}$ para $kg \cdot m^{-3}$.

Onde:

$\dot{m}_{R22}$:	vazão mássica de R22 [$kg \cdot h^{-1}$]
FT_{R22} :	vazão volumétrica de R22 [$m^3 \cdot h^{-1}$]
ρ_{R22} :	densidade do R22 [$kg \cdot m^{-3}$]
v_{R22} :	volume específico do R22 [$m^3 \cdot kg^{-1}$]. O volume específico do R22 (v_{R22}) foi estimado a partir de uma interpolação da relação do volume específico e temperatura do R22 na entrada do medidor de vazão volumétrica (<i>TE_102</i>) [Valores obtidos de: <i>CoolPack Version 4.16. Department of Mechanical Engineering Technical University of Denmark</i>].

$$\dot{m}_p = FT_p \times \rho_p \quad (\text{Eq. A.2})$$

Sendo: $\rho_p = (0,9286 - 0,00057 \times T_p + 0,0311 \times \log(\%W)) \times 1000$. A

multiplicação por (1000) corresponde à transformação de unidade de medida, da densidade, de $kg \cdot dm^{-3}$ para $kg \cdot m^{-3}$.

Onde:

$\dot{m}_p$:	vazão mássica de propilenoglicol $[kg \cdot h^{-1}]$
FT_p :	vazão volumétrica de propilenoglicol $[m^3 \cdot h^{-1}]$
ρ_p :	densidade do propilenoglicol $[kg \cdot m^{-3}]$
T_p :	Temperatura do propilenoglicol na entrada do medidor de vazão volumétrico $[^{\circ}C]$.
$\%W$	Porcentagem mássica de propilenoglicol

O calor de evaporação (Q_e) e de condensação (Q_c) e o trabalho de compressão (W_c) foram determinados baseados nas equações 3.1 a 3.3, respectivamente, onde as entalpias h_1 , h_2 , h_3 e h_4 foram estimadas a partir de interpolação de valores relacionando as temperaturas e as pressões específicas de cada ponto do ciclo ideal de refrigeração com o auxílio de tabelas do *CoolPack Version 4.16*.

O calor retirado do propilenoglicol (Q_p) e transferido ao gás refrigerante R22 foi calculado a partir da equação:

$$Q_p = \dot{m}_p C_{p_p} \Delta T \quad (\text{Eq. A.3})$$

Sendo: $C_{p_p} = 4148,43 + 3,1445 \times T_p - 3,1712 \times (\%w) \times \log(\%w)$

Onde:

$\dot{m}_p$:	vazão mássica de propilenoglicol $[kg \cdot h^{-1}]$
C_{p_p} :	calor específico do propilenoglicol $[J \cdot kg^{-1} \cdot ^{\circ}C^{-1}]$
T_p :	Temperatura do propilenoglicol na entrada do medidor de vazão volumétrico $[^{\circ}C]$.
$\%W$	Porcentagem mássica de propilenoglicol

O cálculo do superaquecimento útil (SAU), superaquecimento total (SAT) e subresfriamento (SUB) é representado pelas Equações (A.4 a A.6), respectivamente.

$$SAU = T_{se} - T_e \quad (\text{Eq. A.4})$$

Onde:

T_e :	Temperatura do R22 na entrada do evaporador (evaporação) $[^{\circ}C]$
T_{se} :	Temperatura do R22 na saída do evaporador $[^{\circ}C]$.

$$SAT = T_{suc} - T_e \quad (\text{Eq. A.5})$$

Onde:

T_{suc} :	Temperatura do R22 na entrada do compressor (sucção) $[^{\circ}C]$
T_e :	Temperatura do R22 na entrada do evaporador (evaporação) $[^{\circ}C]$

$$SUB = T_c - T_{eve} \quad (\text{Eq. A.6})$$

Onde:

T_c :	Temperatura do R22 na entrada do condensador (condensação) $[^{\circ}C]$
T_{eve} :	Temperatura do R22 na da válvula de expansão $[^{\circ}C]$

As Equações (A.7 e A.8) representam o cálculo do coeficiente de performance para o ciclo de Carnot (COP_{Carnot}) e o ciclo Real (COP_{Real}), respectivamente.

$$COP_{Carnot} = \frac{Q_e}{W_c} \quad (\text{Eq. A.7})$$

Onde:

Q_c :	Calor de evaporação $[kJ \cdot kg^{-1}]$
W_c :	Trabalho de compressão $[kJ \cdot kg^{-1}]$

$$COP_{Real} = \frac{Q_p}{P_{comp}} \quad (\text{Eq. A.8})$$

Onde:

Q_p :	Calor retirado do propilenoglicol $[kW]$
P_{comp} :	Potência requerido do compressor $[kW]$

A potência requerida do compressor (P_{comp}) foi calculado a partir da curva de potência do compressor Bitzer octagon, modelo 2FC-2.2, representada pela Equação (A.9).

$$P_{comp} = -0,04707 \times \bar{i}^2 + 1,191 \times \bar{i} - 3,923 \quad (\text{Eq. A.9})$$

Sendo $\bar{i} = i\sqrt{3}$

Onde:

i :	Corrente do compressor [A]
$\bar{i}$:	Corrente do compressor corrigida [A]
$\sqrt{3}$	Fator de correção (devido tipo de ligação Y)

APÊNDICE B: Dinâmica do Sistema de refrigeração para as condições padrões de ensaio (estado estacionário)

A dinâmica do sistema de refrigeração para as condições padrões de ensaio, ou seja, FQ101 (frequência do compressor) igual a 60 Hz, FQ201 (frequência da bomba do evaporador) igual a 60 Hz e sendo 3000 W a carga térmica (Q) adicionada ao propilenoglicol é apresentada nas Figuras B.1 a B.8.

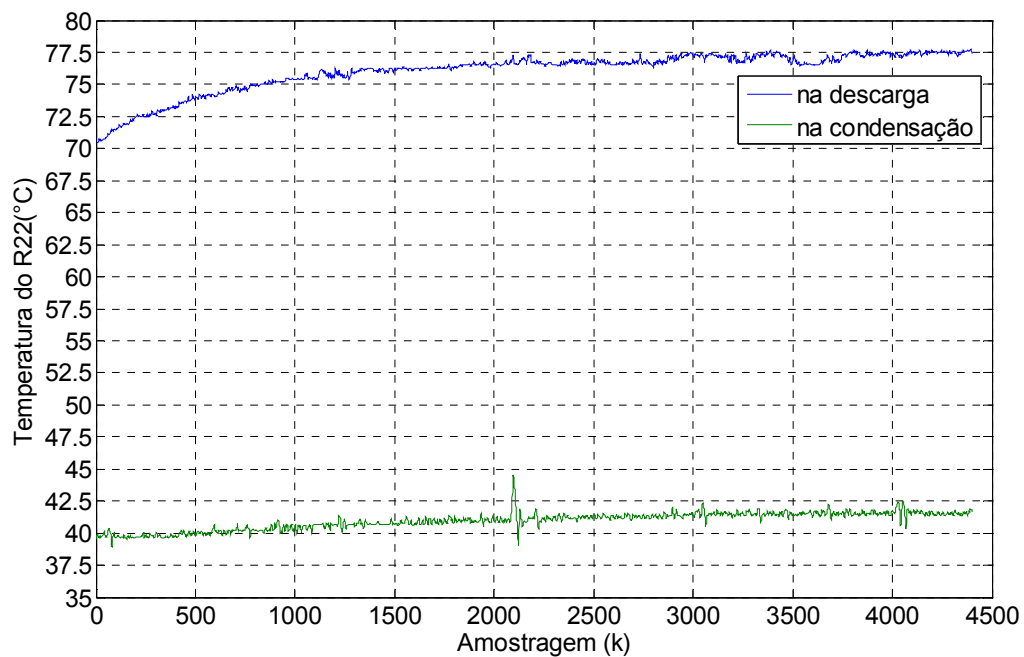


Figura B. 1 – Dinâmica da temperatura de descarga (Td) e de condensação (Tc) com FQ101=60 Hz, FQ201=60 Hz e Q=300 W onde k=1 s

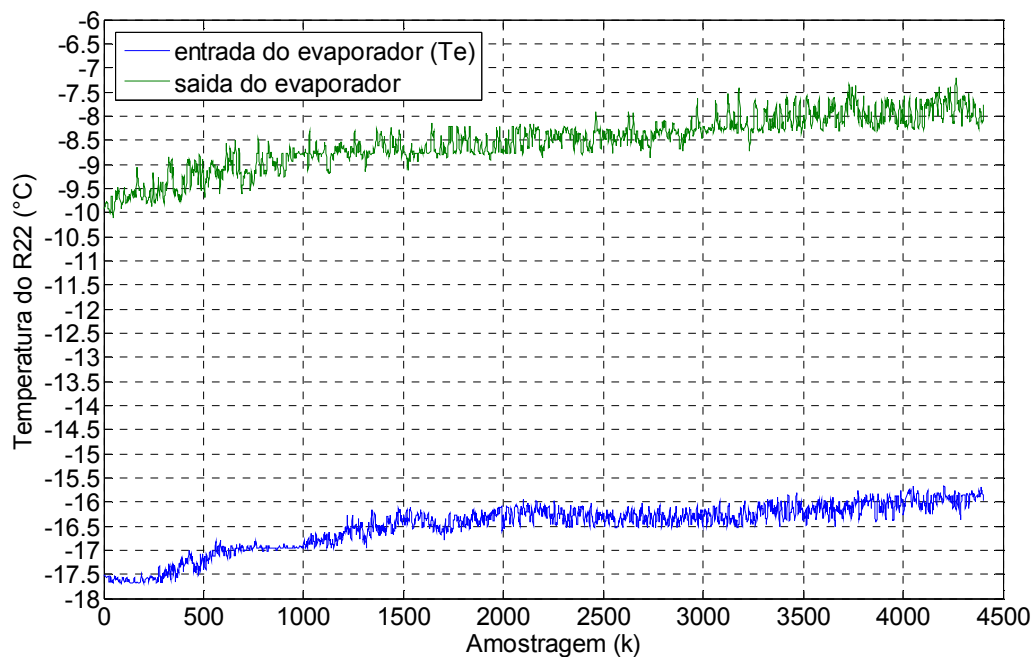


Figura B. 2 - Dinâmica da temperatura do R22 na entrada (T_e) e na saída (T_{rse}) do evaporador com $FQ_{101}=60$ Hz, $FQ_{201}=60$ Hz e $Q=300$ W onde $k=1$ s

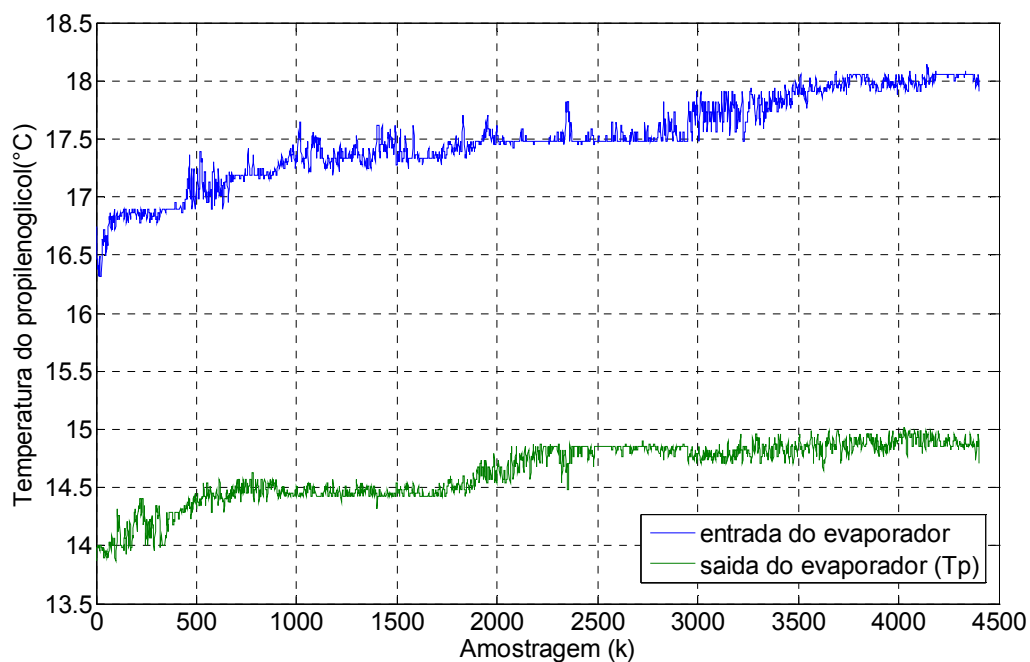


Figura B. 3 - Dinâmica da temperatura do propilenoglicol na entrada (T_{pee}) e na saída (T_p) do evaporador com $FQ_{101}=60$ Hz, $FQ_{201}=60$ Hz e $Q=300$ W onde $k=1$ s

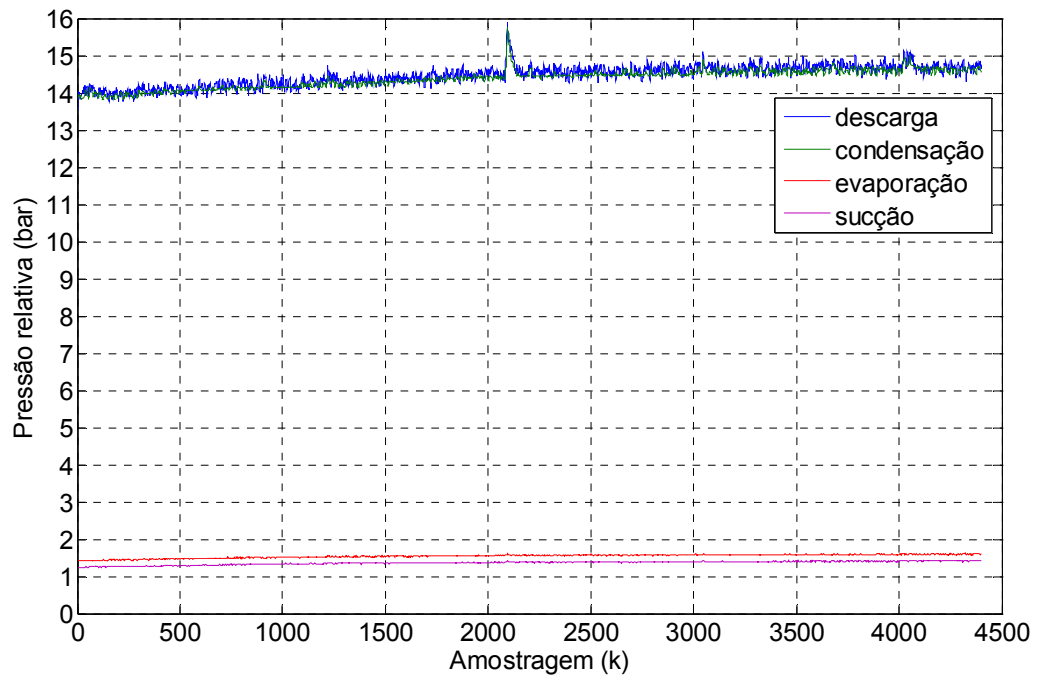


Figura B. 4 - Dinâmica das pressões de descarga (P_d), de condensação (P_c), de evaporação (P_e) e de sucção (P_s) com $FQ_{101}=60$ Hz, $FQ_{201}=60$ Hz e $Q=300$ W onde $k=1$ s

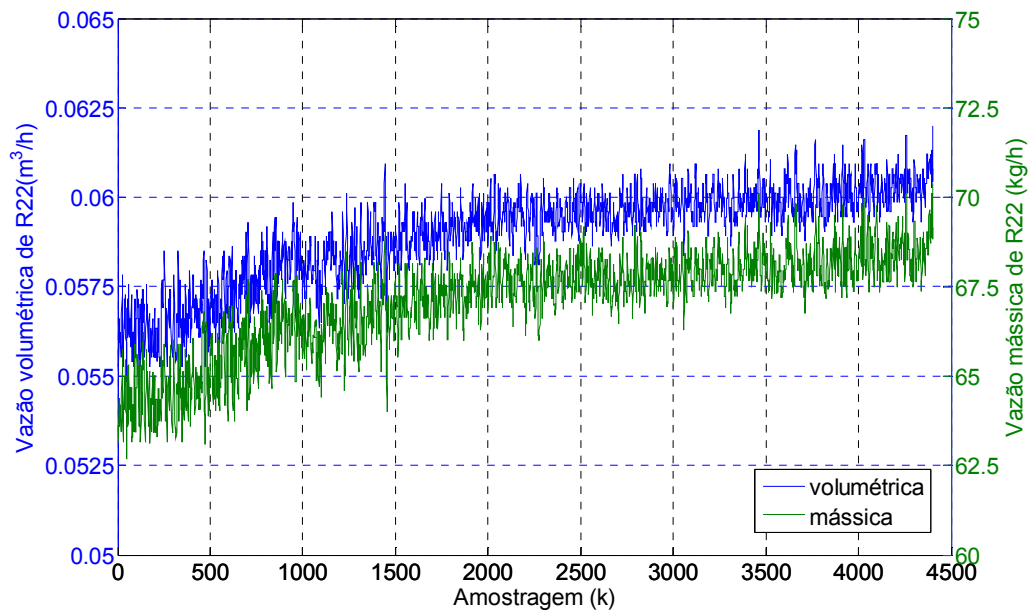


Figura B. 5 - Dinâmica das vazões volumétricas (FR_{22}) e mássicas do R22 (mr) com $FQ_{101}=60$ Hz, $FQ_{201}=60$ Hz e $Q=300$ W onde $k=1$ s

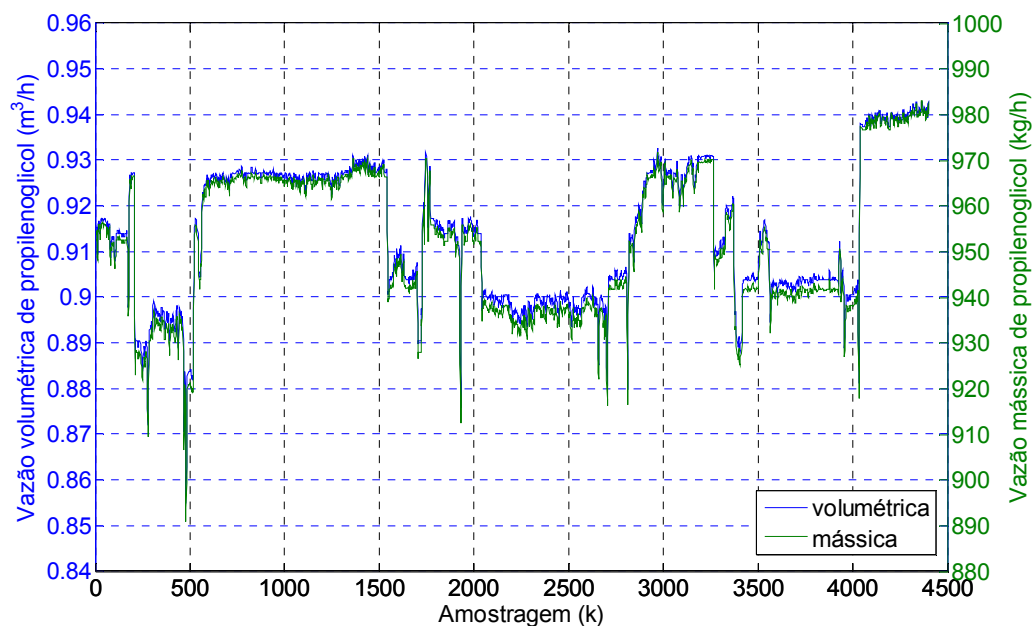


Figura B. 6 - Dinâmica das vazões volumétricas (F_p) e mássicas (m_p) do propilenoglicol com $FQ_{101}=60$ Hz, $FQ_{201}=60$ Hz e $Q=300$ W onde $k=1$ s

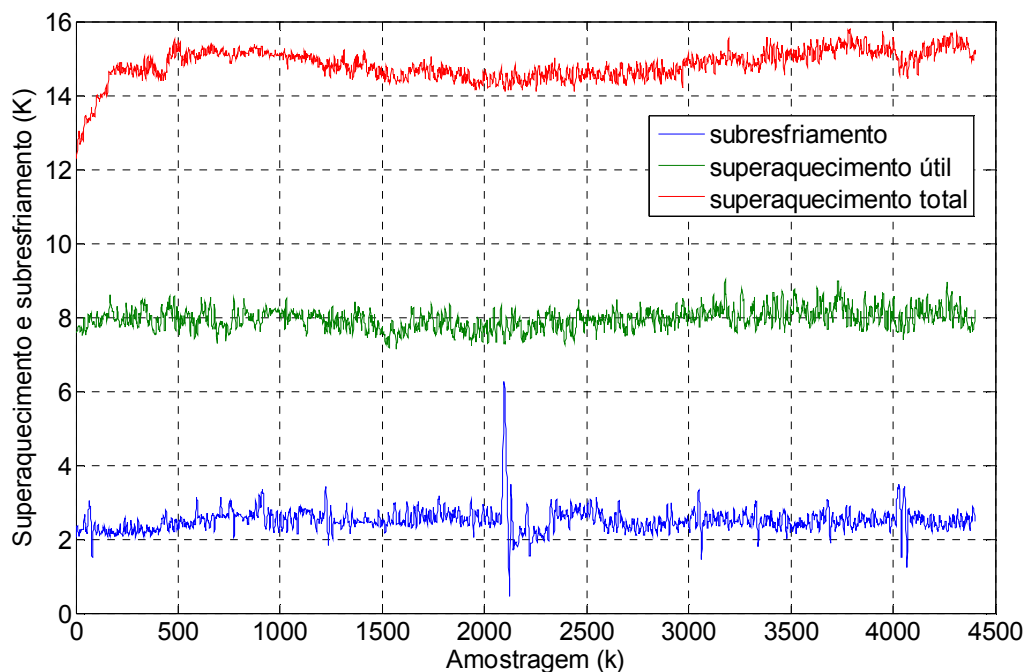


Figura B. 7 - Dinâmica do superaquecimento útil (SAU) e total (SAT) e subresfriamento (SUB) com $FQ_{101}=60$ Hz, $FQ_{201}=60$ Hz e $Q=300$ W onde $k=1$ s

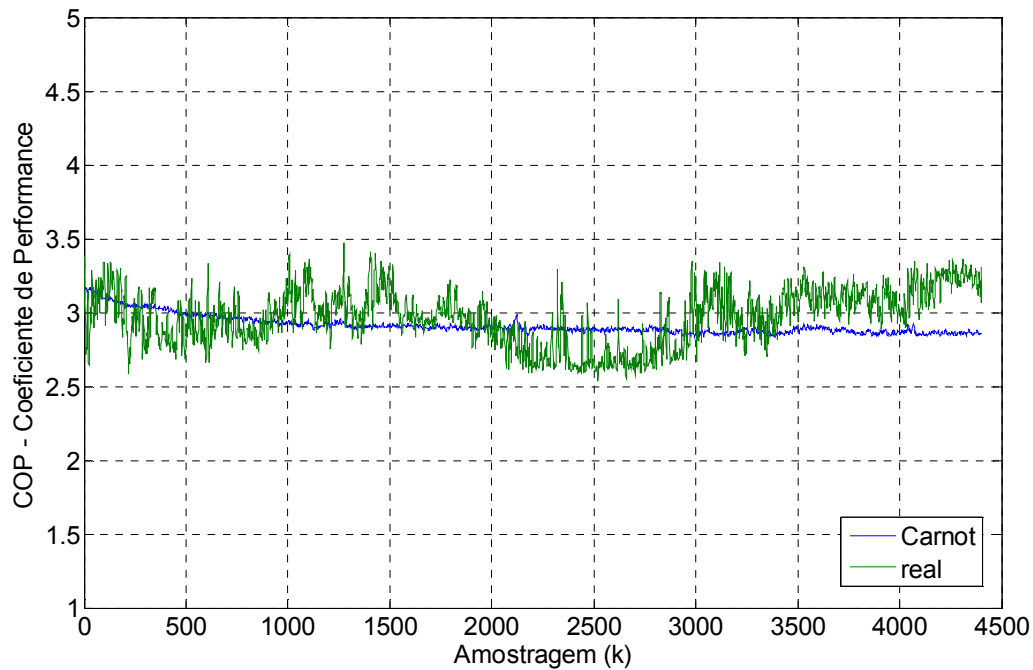


Figura B. 8 - Dinâmica do COP de Carnot (COP_C) e real (COP_R) com $FQ_{101}=60$ Hz, $FQ_{201}=60$ Hz e $Q=300$ W onde $k=1$ s

Os valores dos estados estacionários obtidos das Figuras B.1 a B.8 são apresentados na Tabela B.1.

Tabela B. 1 – Estado estacionário do sistema de refrigeração para as condições padrão, $FQ_{101}=60$ Hz, $FQ_{201}=60$ Hz e $Q=3000$ W

Condições padrão de ensaio: $FQ_{101}=60$ Hz, $FQ_{201}=60$ Hz e $Q=3000$ W					
Variável	Estado estacionário	Variável	Estado estacionário	Variável	Estado estacionário
T_d [°C]	77,3	FR_{22} [m ³ ·h ⁻¹]	0,1	mr [kg·h ⁻¹]	68,3
T_c [°C]	41,6	F_p [m ³ ·h ⁻¹]	0,9	SUB [K]	2,5
T_e [°C]	-16,0	P_d [bar]	14,7	SAU [K]	8,1
Tr_{se} [°C]	-7,9	P_c [bar]	14,6	SAT [K]	15,2
T_s [°C]	-0,8	P_e [bar]	1,6	COP_C	2,9
T_{pee} [°C]	18,0	P_s [bar]	1,4	COP_R	3,1
T_p [°C]	14,9	mp [kg·h ⁻¹]	958,0		

APÊNDICE C: Configurações dos itens OPC e informações do SISMOCAR

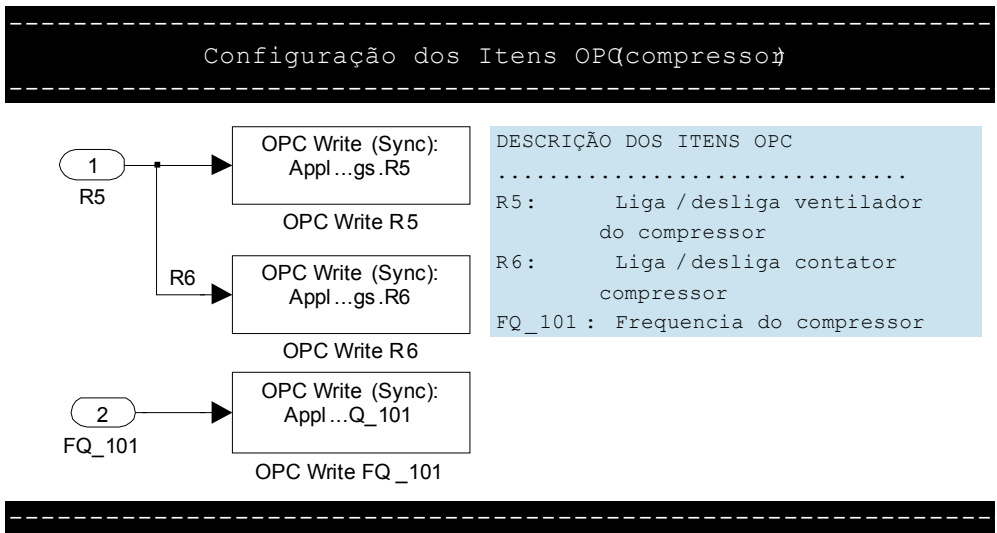


Figura C. 1 – Configuração dos itens de escrita OPC do compressor

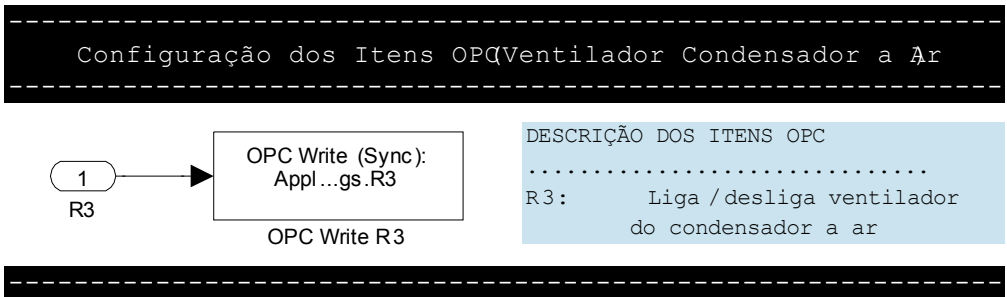


Figura C. 2 – Configuração dos itens de escrita OPC do ventilador do condensador a ar

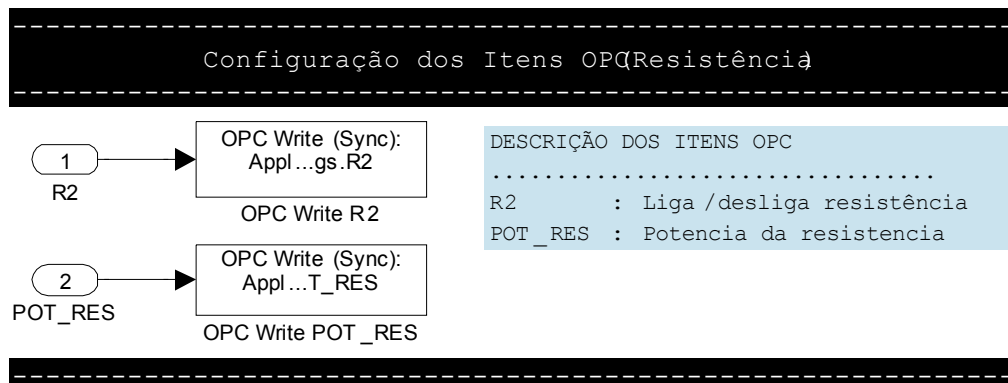


Figura C. 3 – Configuração dos itens de escrita OPC do ventilador da resistência

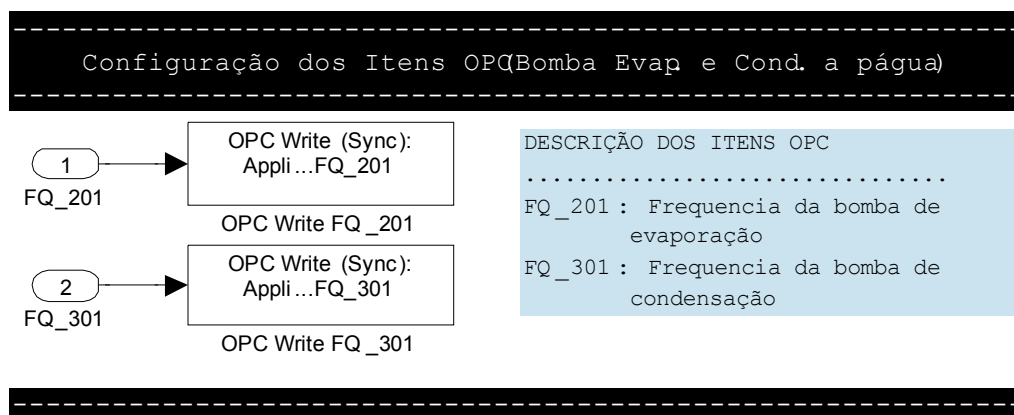


Figura C. 4 – Configuração dos itens de escrita OPC da bomba do evaporador e condensador

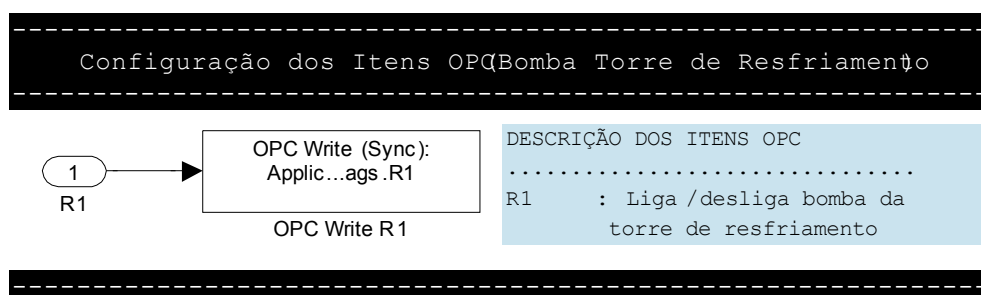


Figura C. 5 - Configuração dos itens de escrita OPC da bomba da torre de resfriamento

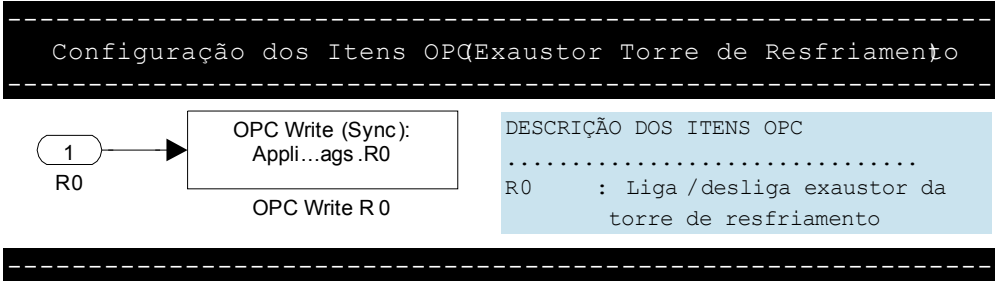


Figura C. 6 – Configuração dos itens de escrita OPC do exaustor da bomba de resfriamento

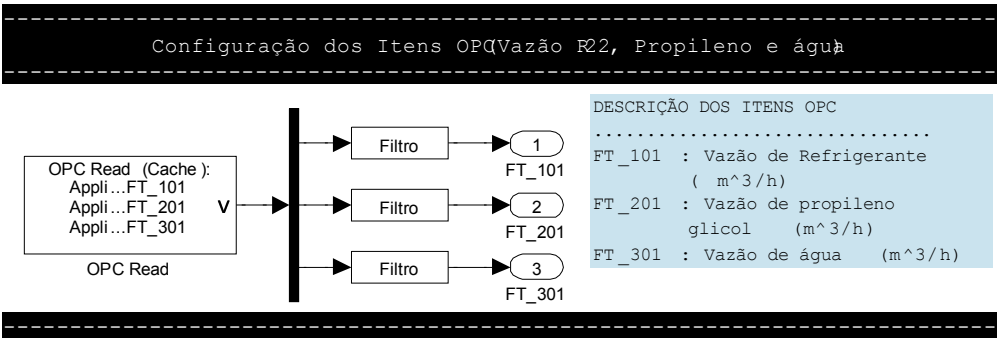


Figura C. 7 – Configuração dos itens de leitura OPC das vazões do ciclo de refrigeração

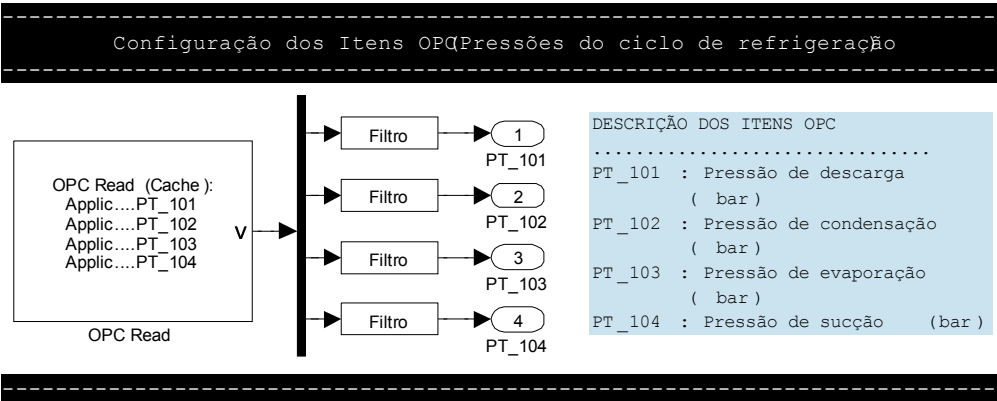


Figura C. 8 – Configuração dos itens de leitura OPC das pressões do ciclo de refrigeração

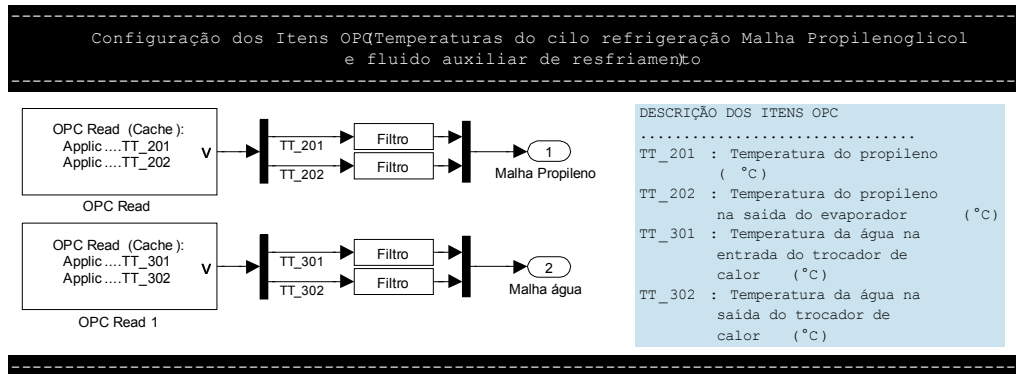


Figura C. 9 – Configuração dos itens de leitura OPC das temperaturas das malhas de propilenoglicol e do fluido auxiliar de resfriamento

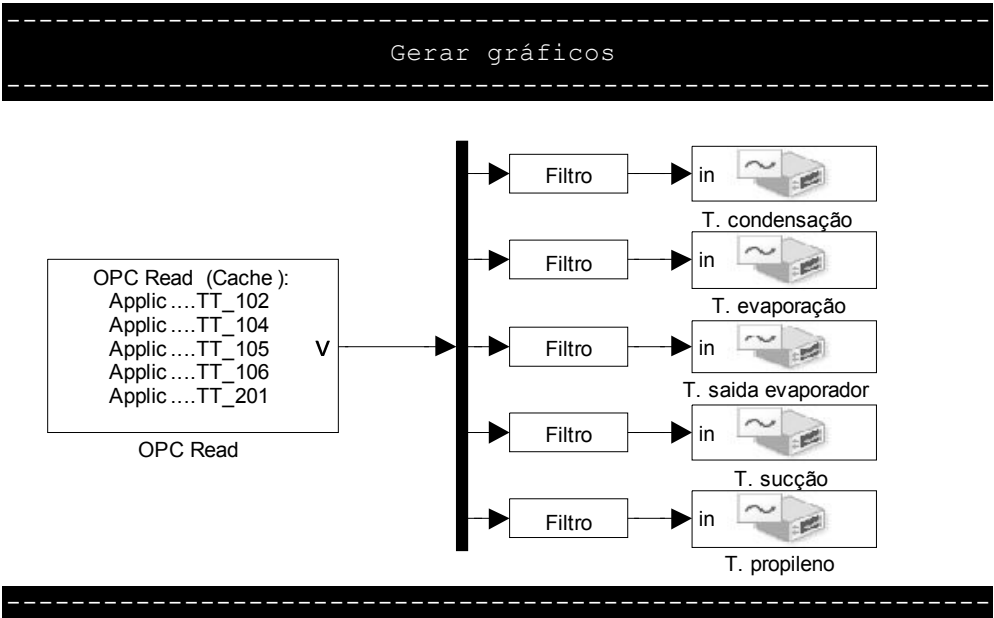


Figura C. 10 – Configuração dos itens de leitura OPC para geração dos gráficos de monitoramento

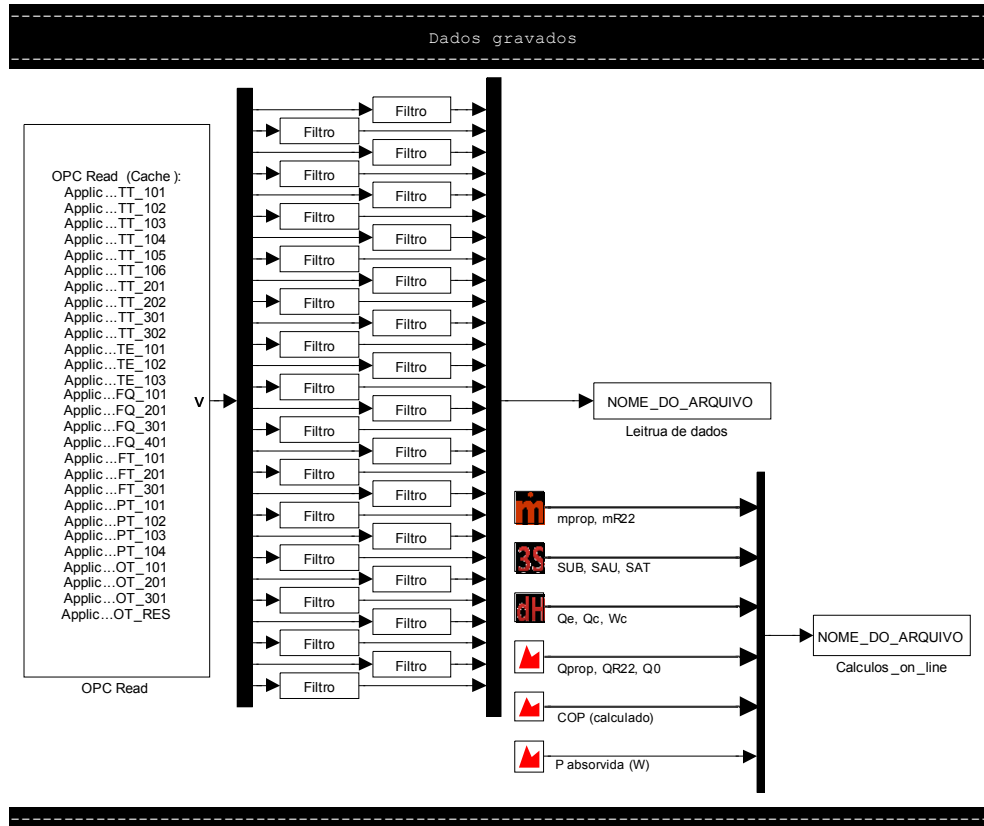


Figura C. 11 – Configuração dos itens de leitura OPC para geração do banco de dados (arquivo .m)

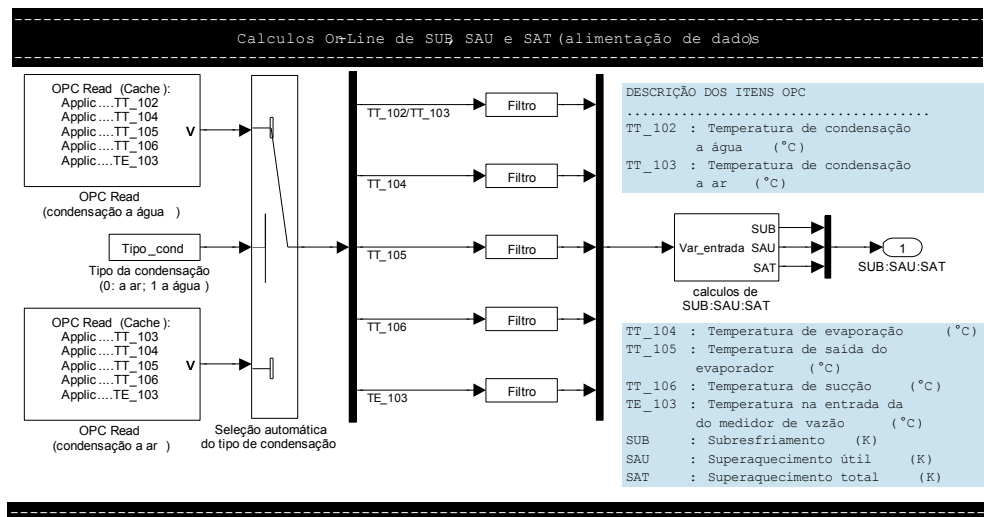


Figura C. 12 - Configuração dos itens de leitura OPC para o cálculo do subresfriamento, superaquecimento útil e total.

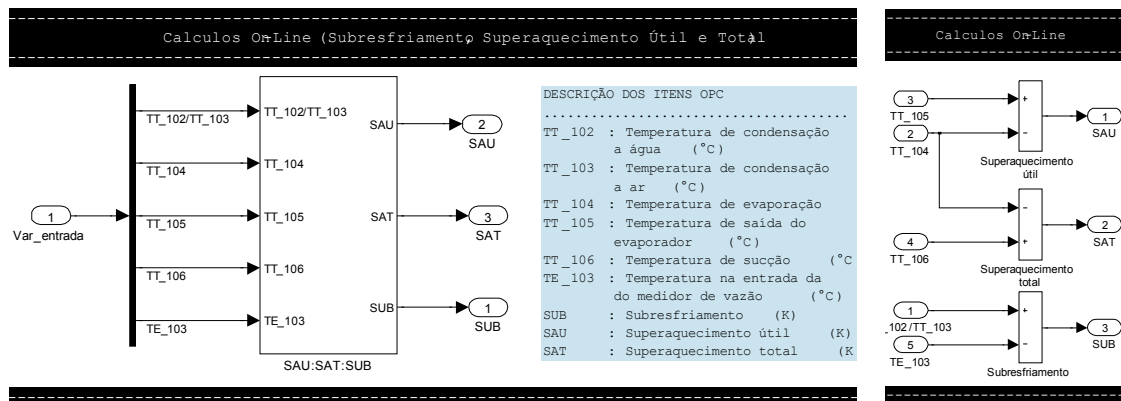


Figura C. 13 – cálculo on-line do subresfriamento e superaquecimento útil e total

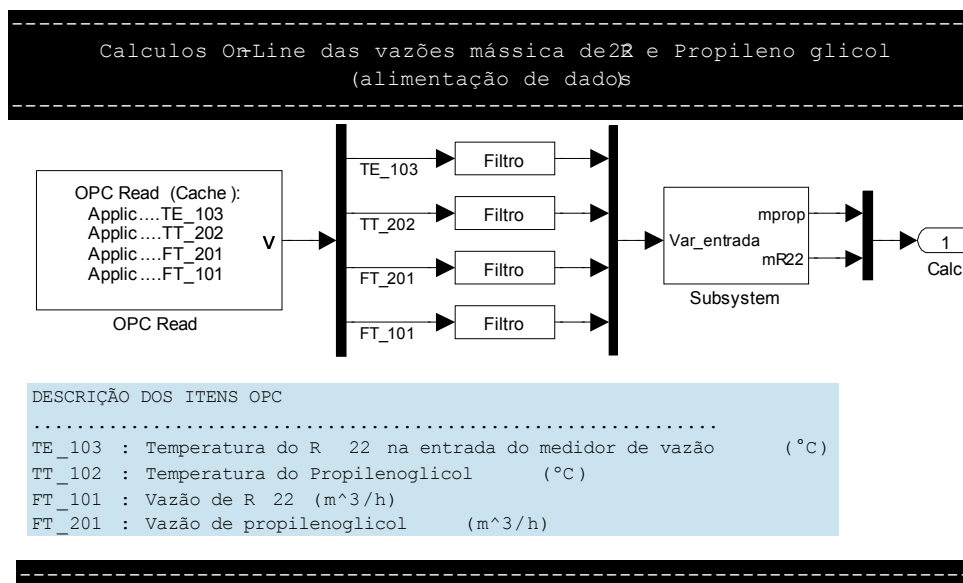


Figura C. 14 – Configuração dos itens de leitura OPC para o cálculo das vazões mássicas de R22 e propilenoglicol

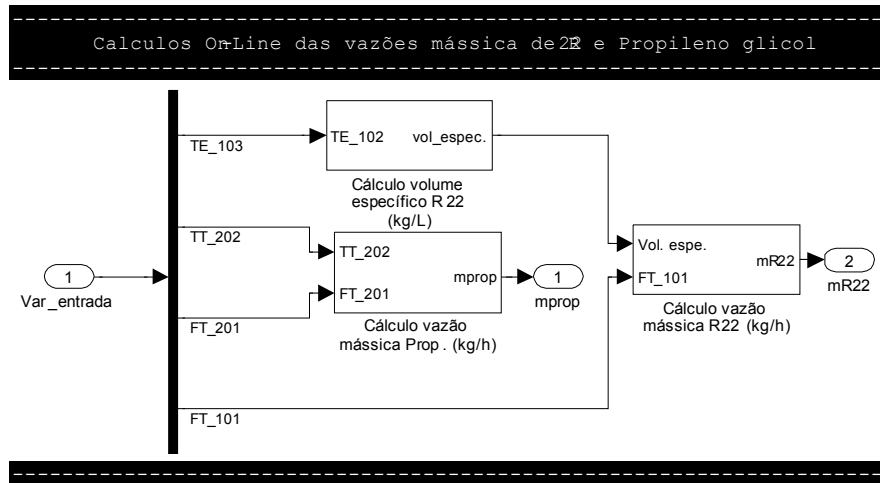


Figura C. 15 - Cálculo das vazões mássicas de R22 e propilenoglicol

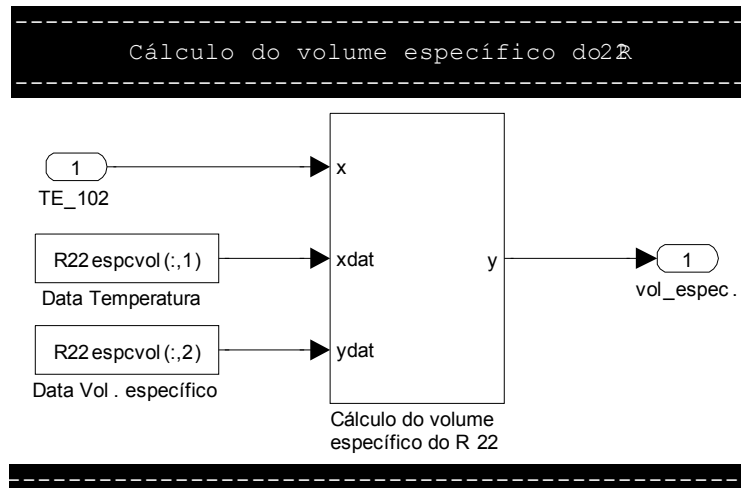


Figura C. 16 - Cálculo do volume específico de R22

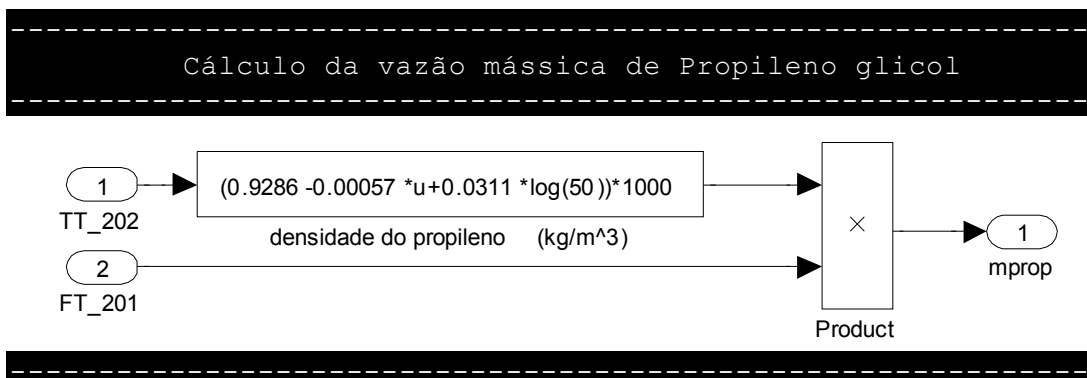


Figura C. 17 - Cálculo das vazões mássicas de propilenoglicol

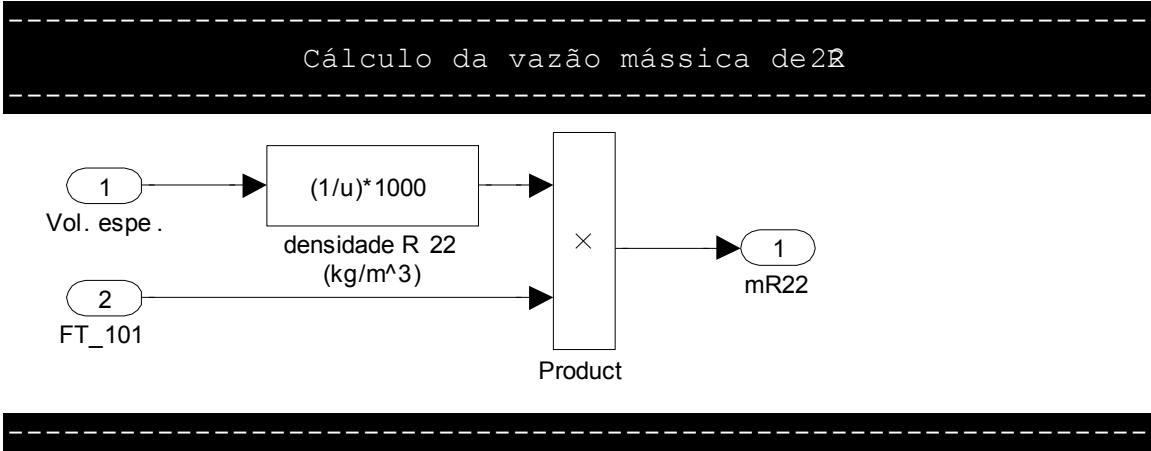


Figura C. 18 - Cálculo das vazões mássicas de R22

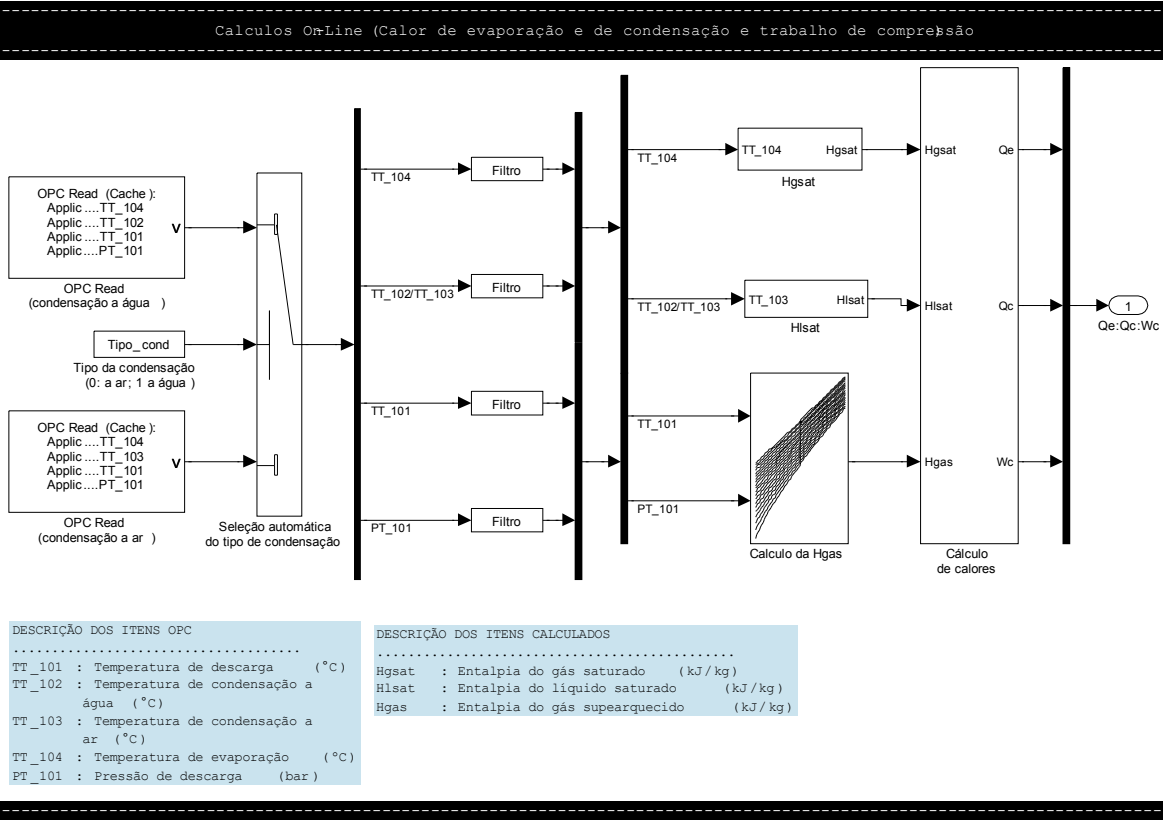


Figura C. 19 – Configuração dos itens de leitura OPC para o cálculo do calor de evaporação e de condensação trabalho de compressão

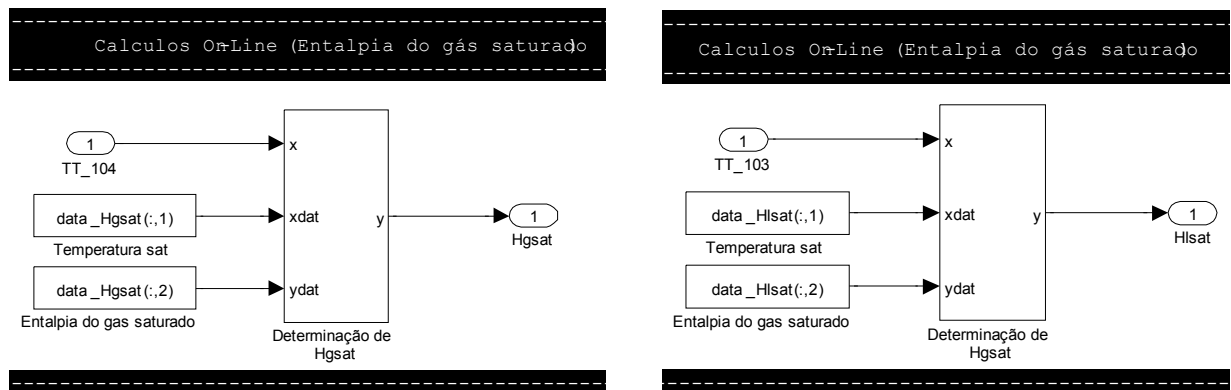


Figura C. 20 – Cálculo as entalpia do gás saturado e do líquido saturado

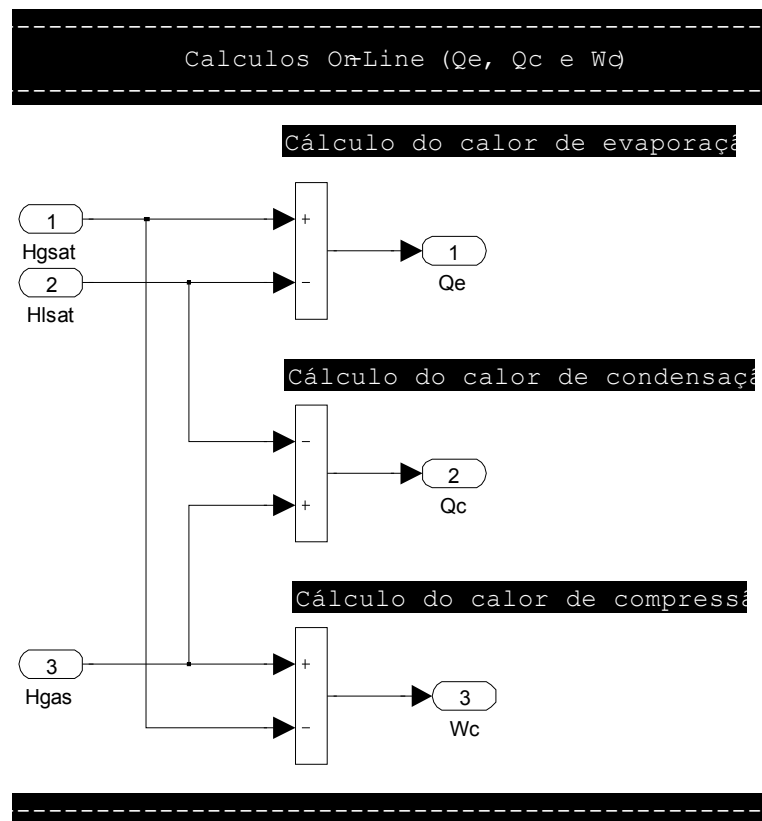


Figura C. 21 - cálculo do calor de evaporação e de condensação trabalho de compressão

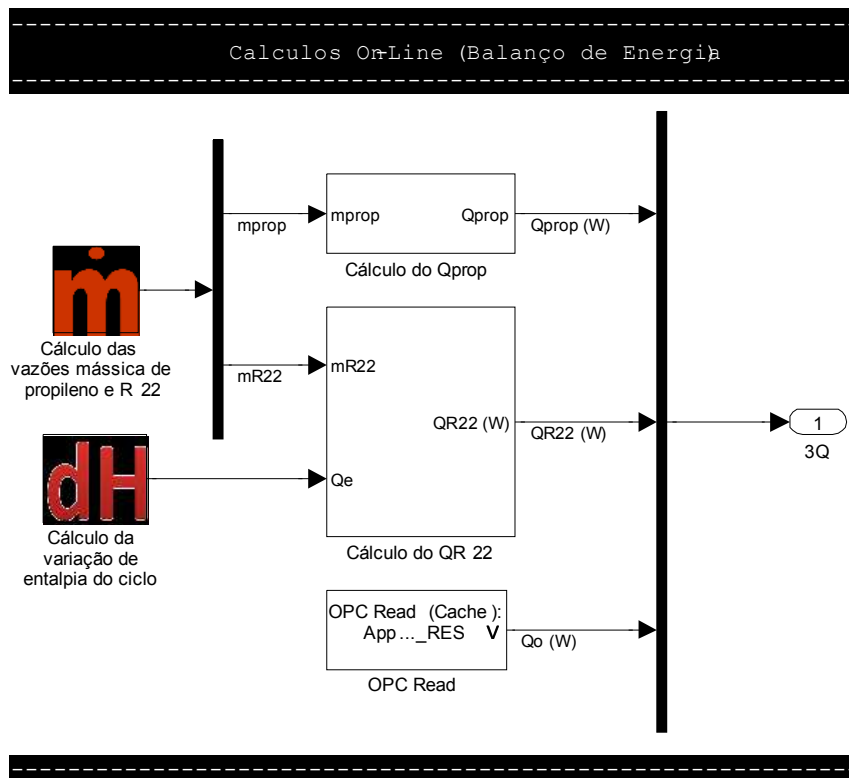


Figura C. 22 – Balanço de energia on-line

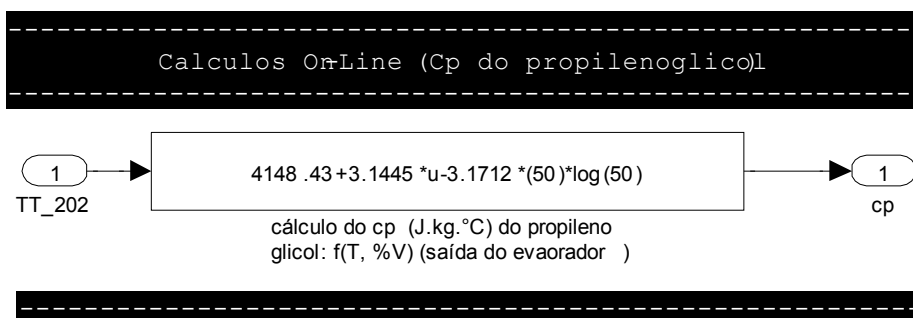


Figura C. 23 – Cálculo do Cp do propilenoglicol

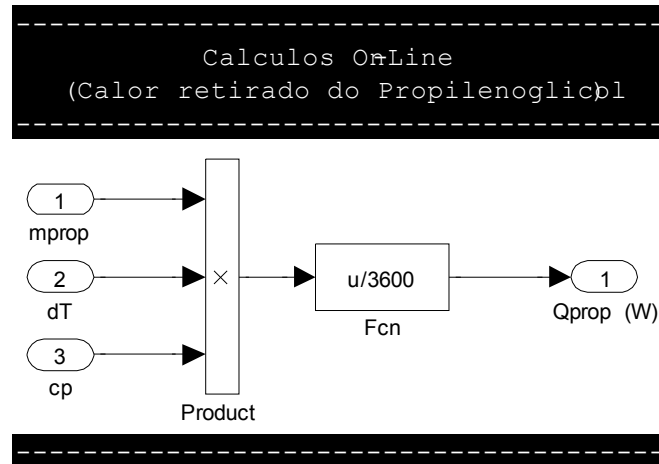


Figura C. 24 – Cálculo retirado do propilenoglicol

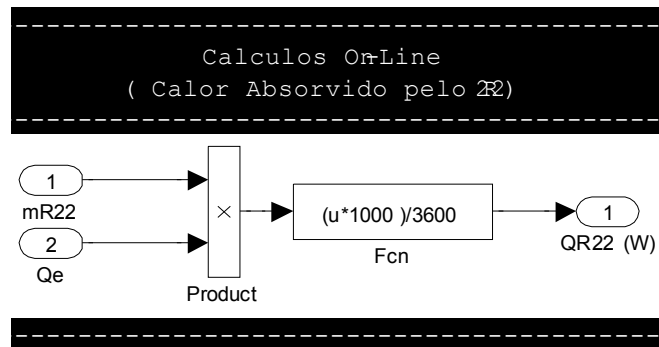


Figura C. 25 – Calor absorvido pelo R22

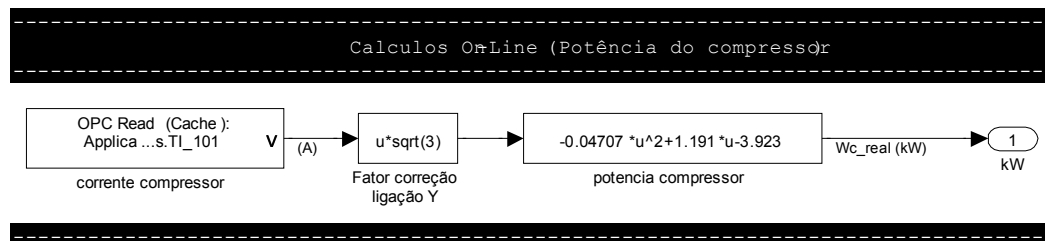
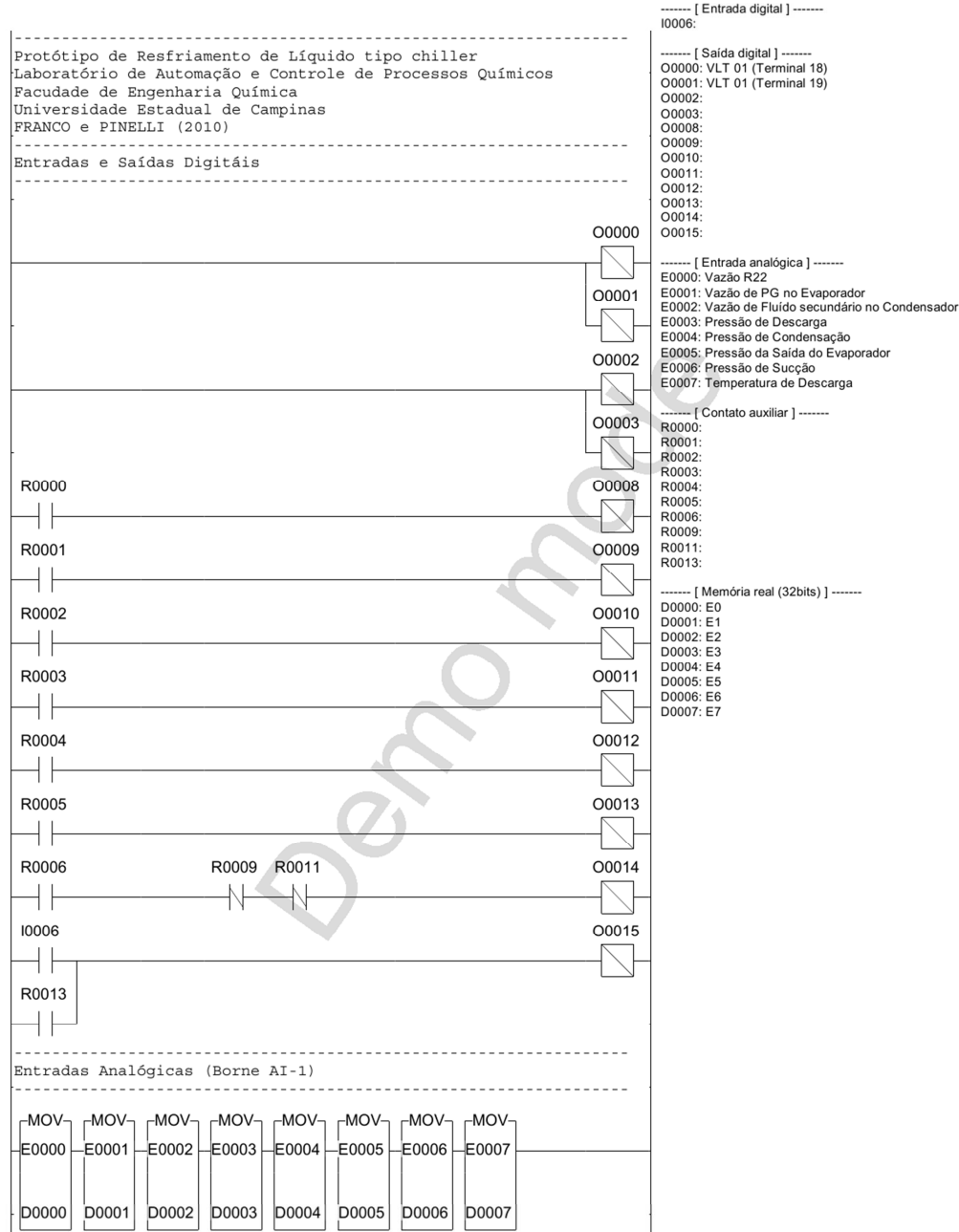


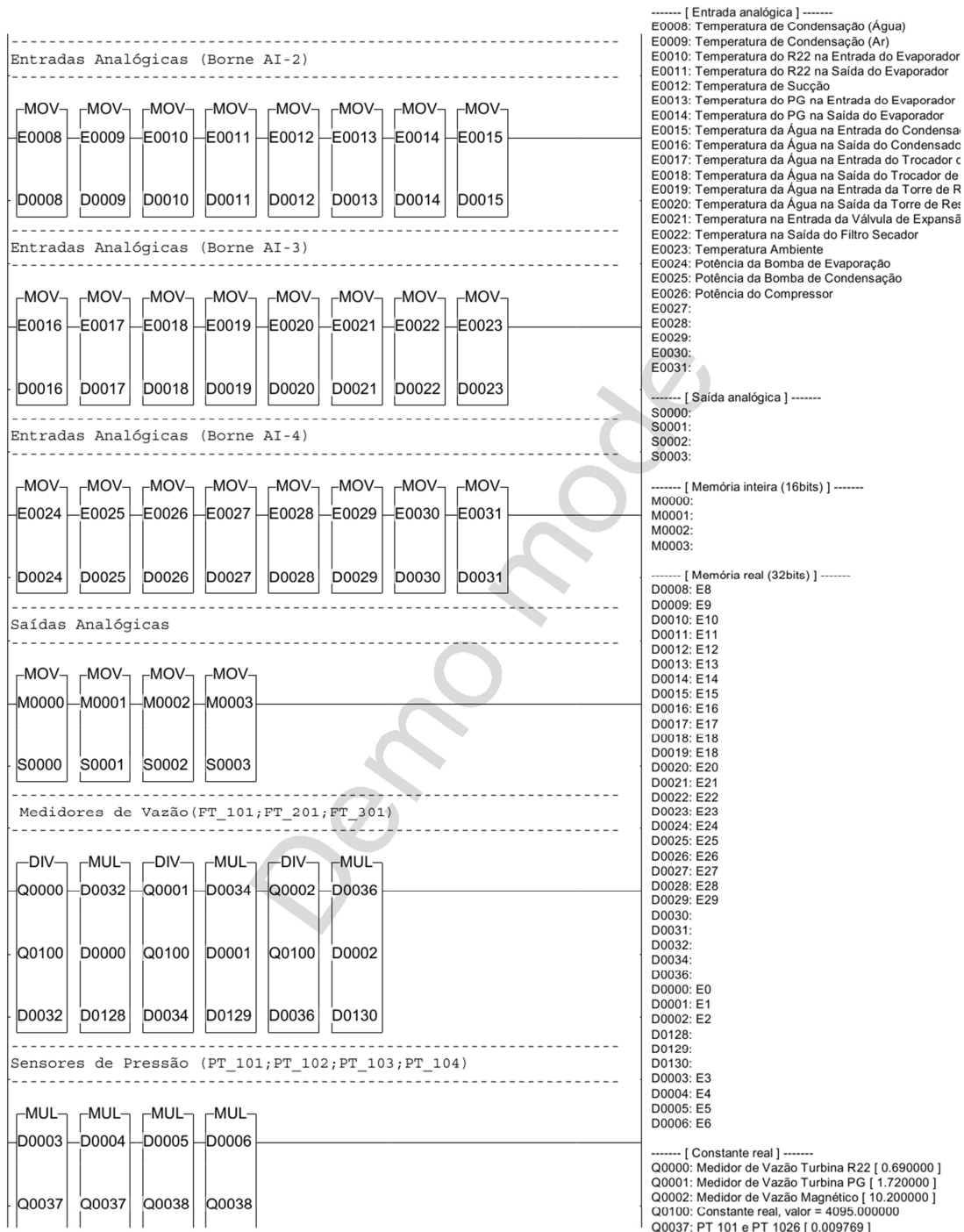
Figura C. 26 – Calculo da potência do compressor

APÊNDICE D: Programação LADDER

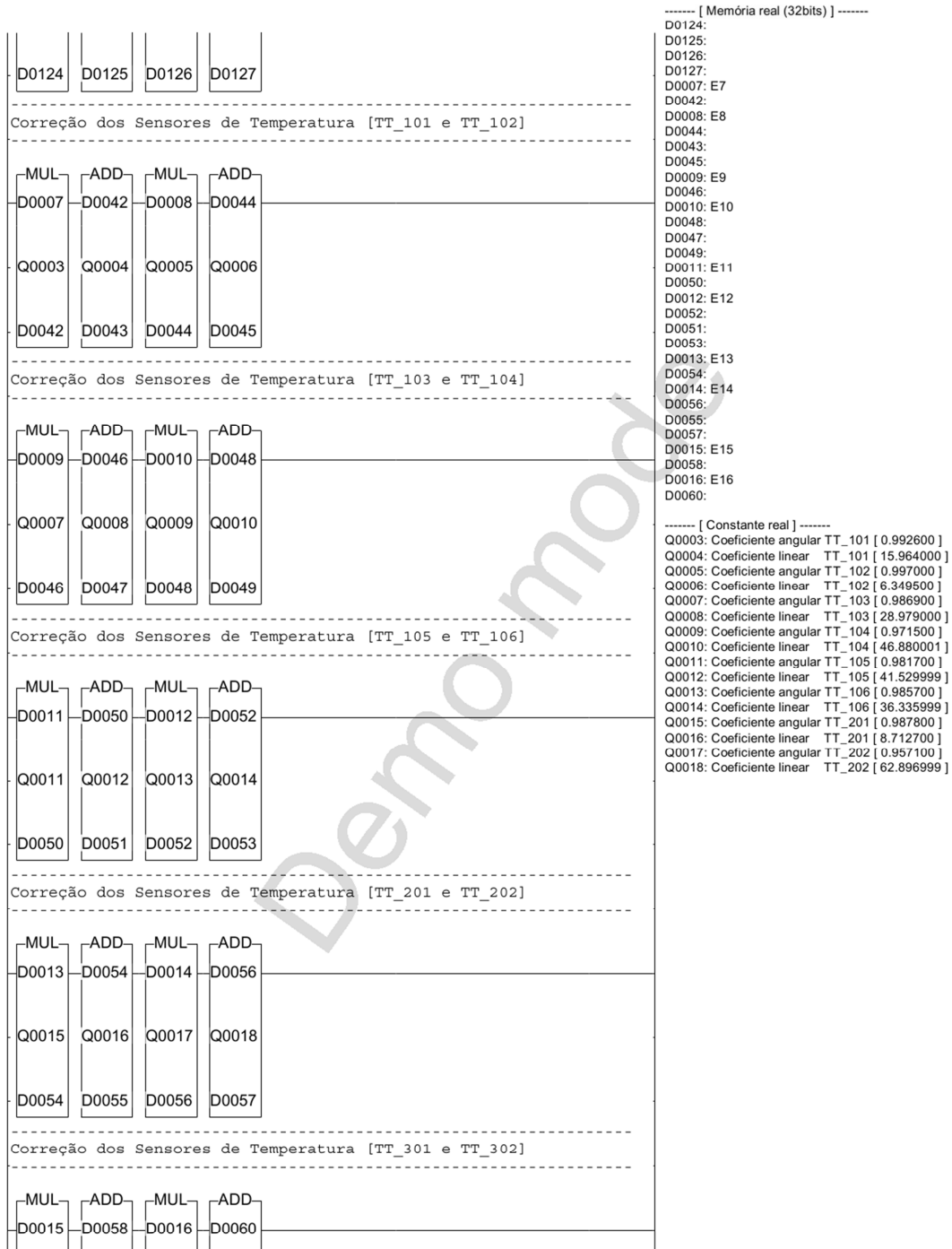
Aplicação: Sistema de Refrigeração LCAP

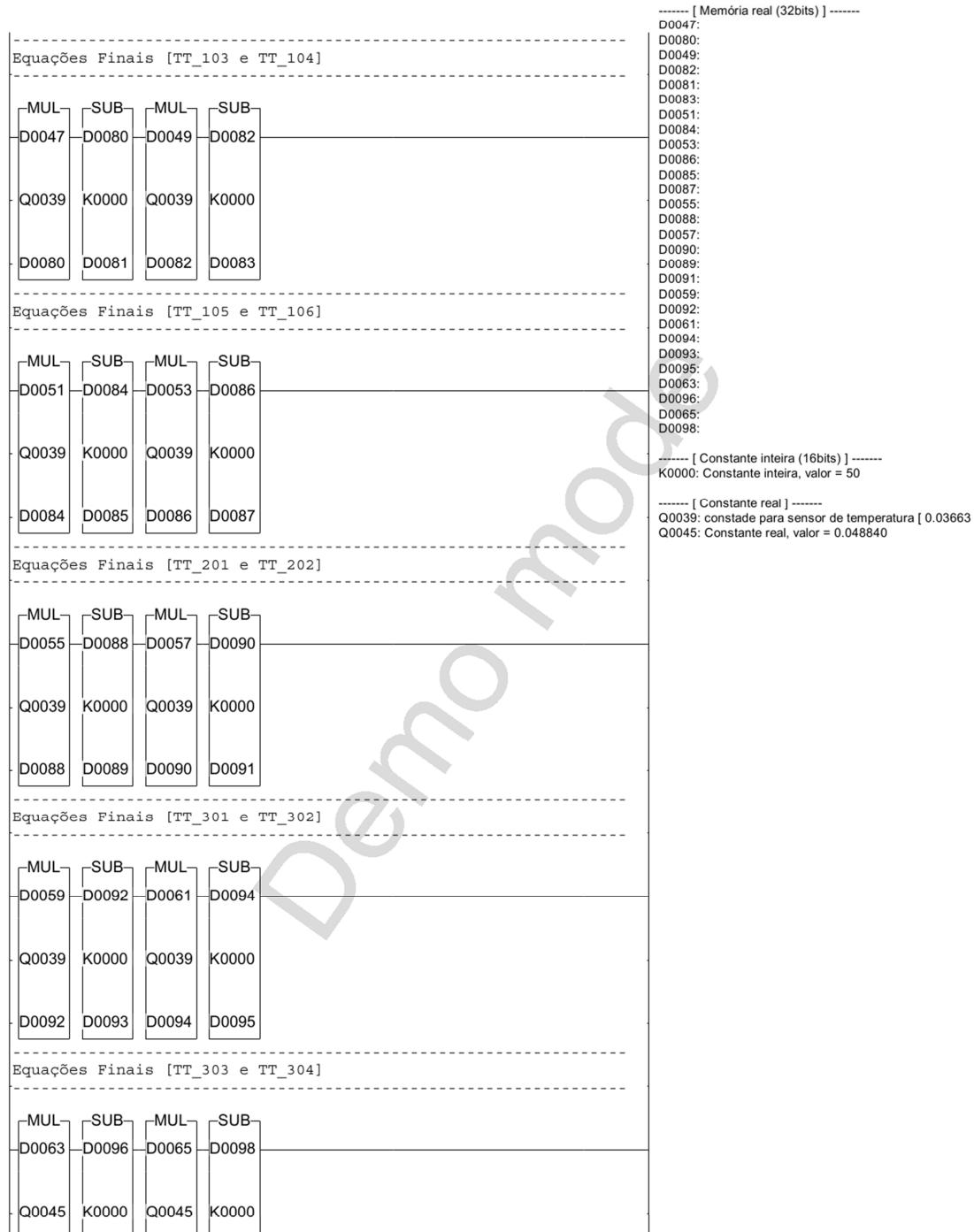
SPDSW V2.8.07

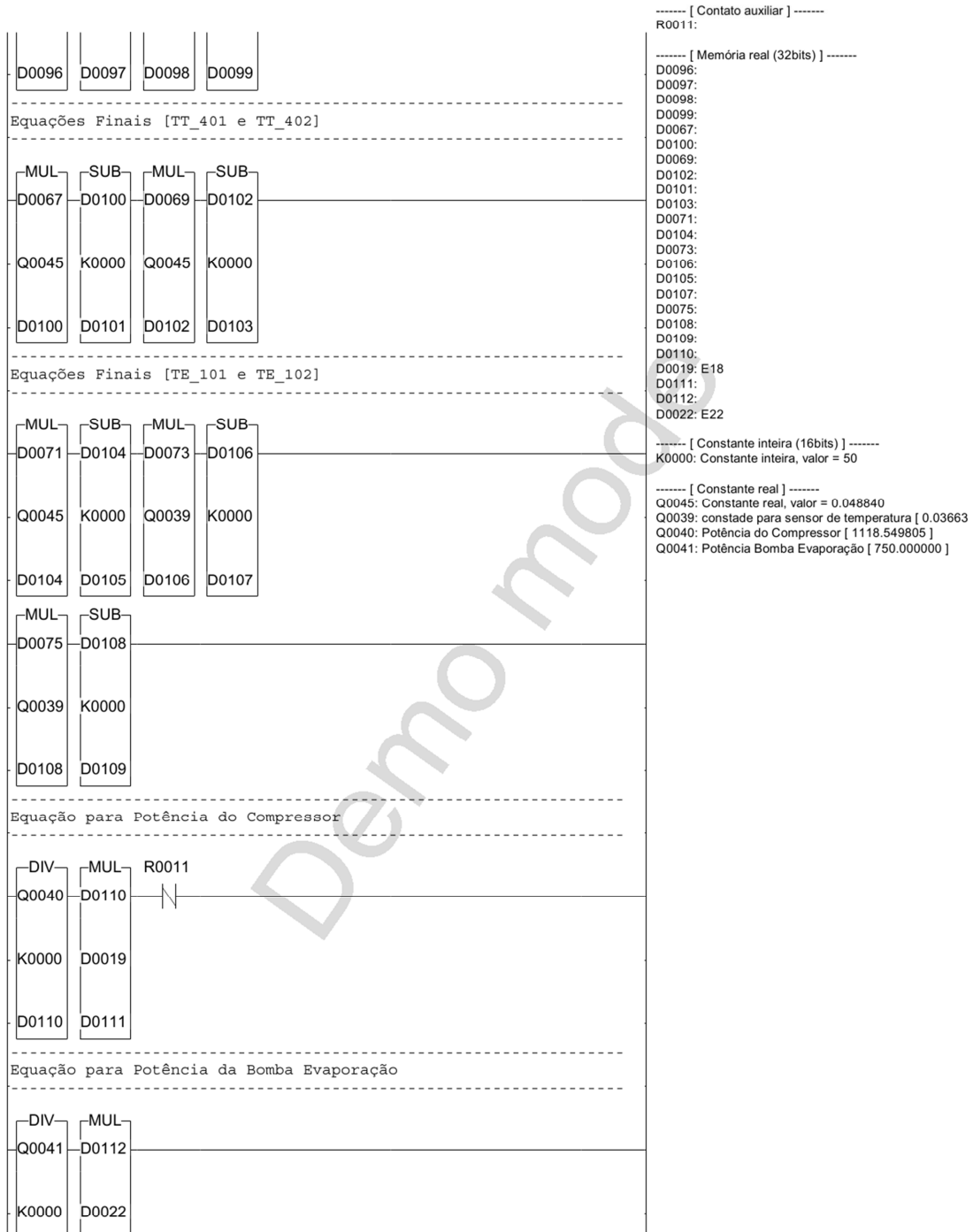


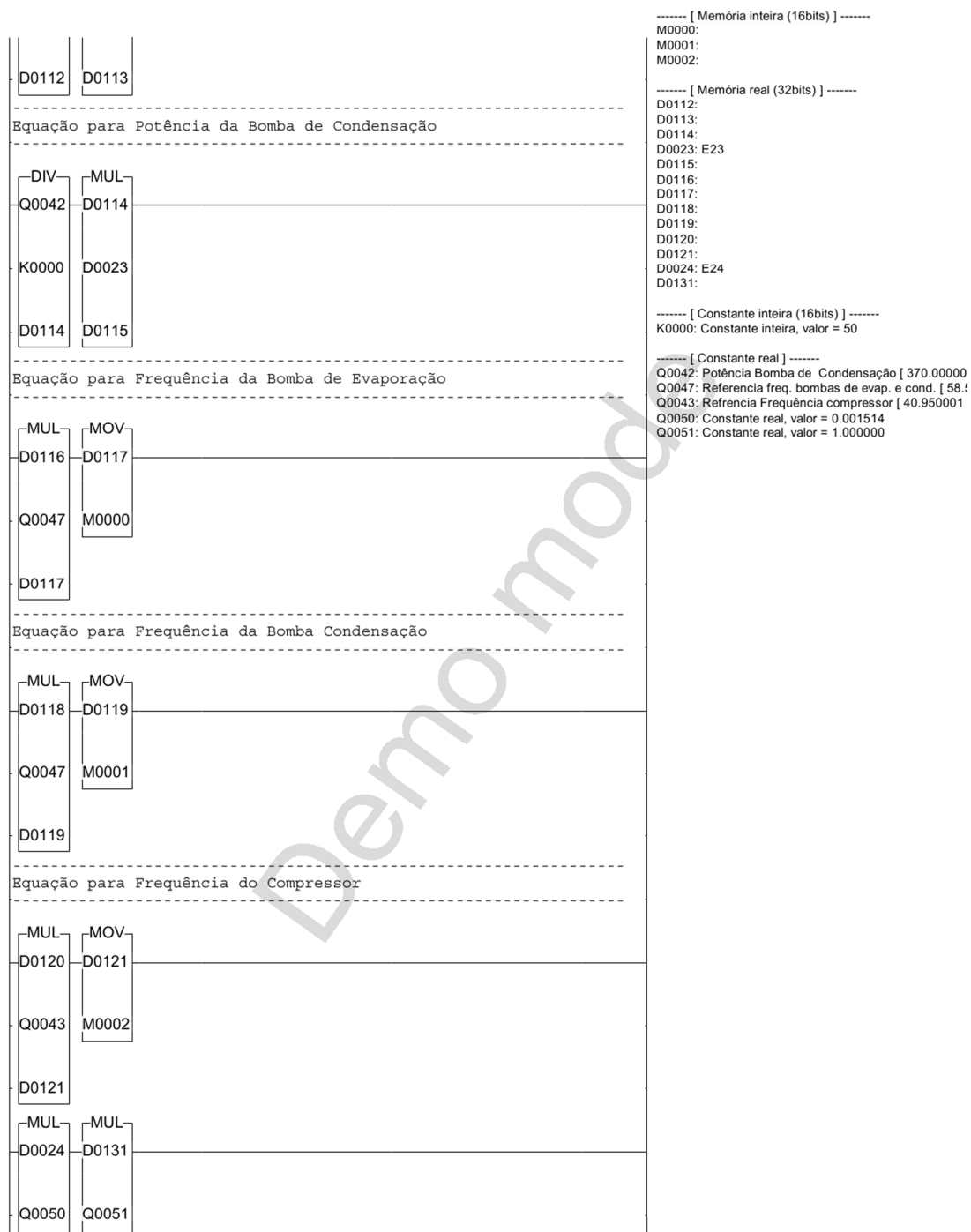


----- [Entrada analógica] -----
 E0008: Temperatura de Condensação (Água)
 E0009: Temperatura de Condensação (Ar)
 E0010: Temperatura do R22 na Entrada do Evaporador
 E0011: Temperatura do R22 na Saída do Evaporador
 E0012: Temperatura de Sucção
 E0013: Temperatura do PG na Entrada do Evaporador
 E0014: Temperatura do PG na Saída do Evaporador
 E0015: Temperatura da Água na Entrada do Condensador
 E0016: Temperatura da Água na Saída do Condensador
 E0017: Temperatura da Água na Entrada do Trocador de Calor
 E0018: Temperatura da Água na Saída do Trocador de Calor
 E0019: Temperatura da Água na Entrada da Torre de Resfriamento
 E0020: Temperatura da Água na Saída da Torre de Resfriamento
 E0021: Temperatura na Entrada da Válvula de Expansão
 E0022: Temperatura na Saída do Filtro Secador
 E0023: Temperatura Ambiente
 E0024: Potência da Bomba de Evaporação
 E0025: Potência da Bomba de Condensação
 E0026: Potência do Compressor
 E0027:
 E0028:
 E0029:
 E0030:
 E0031:
 ----- [Saída analógica] -----
 S0000:
 S0001:
 S0002:
 S0003:
 ----- [Memória inteira (16bits)] -----
 M0000:
 M0001:
 M0002:
 M0003:
 ----- [Memória real (32bits)] -----
 D0008: E8
 D0009: E9
 D0010: E10
 D0011: E11
 D0012: E12
 D0013: E13
 D0014: E14
 D0015: E15
 D0016: E16
 D0017: E17
 D0018: E18
 D0019: E18
 D0020: E20
 D0021: E21
 D0022: E22
 D0023: E23
 D0024: E24
 D0025: E25
 D0026: E26
 D0027: E27
 D0028: E28
 D0029: E29
 D0030:
 D0031:
 D0032:
 D0034:
 D0036:
 D0000: E0
 D0001: E1
 D0002: E2
 D0128:
 D0129:
 D0130:
 D0003: E3
 D0004: E4
 D0005: E5
 D0006: E6
 ----- [Constante real] -----
 Q0000: Medidor de Vazão Turbina R22 [0.690000]
 Q0001: Medidor de Vazão Turbina PG [1.720000]
 Q0002: Medidor de Vazão Magnético [1.200000]
 Q0100: Constante real, valor = 4095.000000
 Q0037: PT 101 e PT 102 [0.009769]









APÊNDICE E: Representação explícita dos modelos Takagi-Sugeno

E.1 Modelos Takagi-Sugeno para o sistema de refrigeração contendo um compressor aberto

E.1a Representação explícita baseada nos consequentes das regras fuzzy, do modelo Takagi-Sugeno para a temperatura de condensação, $T_{condi} = q_{i1} + q_{i2} + q_{i3} + q_{i4} + q_{i0}$

FR¹: *If (FQ101 is HL) and (FQ201 is LH) and (Tpeev is HL) and (Tcond_(k-1) is HL) then*

$$T_{cond} = 0,00355 \cdot FQ101 + 0,00686 \cdot FQ201 + 0,9677 \cdot Tpeev + 0,936 \cdot T_{cond(k-1)} + 0,00241$$

FR²: *If (FQ101 is LH) and (FQ201 is HH) and (Tpeev is LL) and (Tcond_(k-1) is LH) then*

$$T_{cond} = -0,00284 \cdot FQ101 - 0,02087 \cdot FQ201 + 0,9670 \cdot Tpeev + 0,542 \cdot T_{cond(k-1)} + 0,01974$$

FR³: *If (FQ101 is HM) and (FQ201 is LL) and (Tpeev is LM) and (Tcond_(k-1) is LM) then*

$$T_{cond} = 0,03562 \cdot FQ101 - 0,01611 \cdot FQ201 + 0,8705 \cdot Tpeev - 0,268 \cdot T_{cond(k-1)} + 0,08387$$

FR⁴: *If (FQ101 is LL) and (FQ201 is LM) and (Tpeev is HH) and (Tcond_(k-1) is LL) then*

$$T_{cond} = -0,74240 \cdot FQ101 + 0,07710 \cdot FQ201 + 0,8315 \cdot Tpeev + 57,760 \cdot T_{cond(k-1)} - 0,78470$$

FR⁵: *If (FQ101 is HH) and (FQ201 is HL) and (Tpeev is LH) and (Tcond_(k-1) is HM) then*

$$T_{cond} = -0,02293 \cdot FQ101 + 0,14050 \cdot FQ201 + 0,7958 \cdot Tpeev + 8,672 \cdot T_{cond(k-1)} - 0,01241$$

FR⁶: If (FQ101 is LM) and (FQ201 is HM) and (Tpeev is HM) and (Tcond_(k-1) is HH) then

$$T_{cond} = -0,01986 \cdot FQ101 + 0,06675 \cdot FQ201 + 0,5487 \cdot T_{peev} + 11,260 \cdot T_{cond(k-1)} + 0,16260$$

E.1b Representação explícita baseada nos consequentes das regras fuzzy, do modelo Takagi-Sugeno para a temperatura de evaporação, $T_{evapi} = q_{i1} + q_{i2} + q_{i3} + q_{i4} + q_{i0}$

FR¹: If (FQ101 is LH) and (FQ201 is LH) and (Tpeev is LH) and (Tevap_(k-1) is LH) then

$$T_{evap} = -0,00330 \cdot FQ101 + 0,03935 \cdot FQ201 + 0,9450 \cdot T_{peev} - 0,204 \cdot T_{evap(k-1)} - 0,00887$$

FR²: If (FQ101 is HL) and (FQ201 is HH) and (Tpeev is LL) and (Tevap_(k-1) is HL) then

$$T_{evap} = 0,01610 \cdot FQ101 - 0,03925 \cdot FQ201 + 0,6374 \cdot T_{peev} + 12,930 \cdot T_{evap(k-1)} - 0,33910$$

FR³: If (FQ101 is LM) and (FQ201 is LM) and (Tpeev is HM) and (Tevap_(k-1) is HM) then

$$T_{evap} = 0,01635 \cdot FQ101 - 0,00202 \cdot FQ201 + 0,9722 \cdot T_{peev} - 0,906 \cdot T_{evap_{k-1}} + 0,00561$$

FR⁴: If (FQ101 is HM) and (FQ201 is LL) and (Tpeev is HL) and (Tevap_(k-1) is LM) then

$$T_{evap} = -0,05165 \cdot FQ101 + 0,04465 \cdot FQ201 + 0,9016 \cdot T_{peev} - 2,960 \cdot T_{evap(k-1)} + 0,04592$$

FR⁵: If (FQ101 is HH) and (FQ201 is HL) and (Tpeev is LM) and (Tevap_(k-1) is LL) then

$$T_{evap} = 5,61200 \cdot FQ101 + 0,01489 \cdot FQ201 + 0,9314 \cdot T_{peev} - 223,200 \cdot T_{evap_{k-1}} - 0,03685$$

FR⁶: If (FQ101 is LL) and (FQ201 is HM) and (Tpeev is HH) and (Tevap_(k-1) is HH) then

$$T_{evap} = 0,22200 \cdot FQ101 + 0,32230 \cdot FQ201 + 0,3824 \cdot T_{peev} - 17,780 \cdot T_{evap(k-1)} + 0,16050$$

E.1c Representação explícita baseada nos consequentes das regras fuzzy, do modelo Takagi-Sugeno para a temperatura do propilenoglicol, $T_{prop_i} = q_{i1} + q_{i2} + q_{i3} + q_{i4} + q_{i0}$

FR¹: If (FQ101 is LH) and (FQ201 is LH) and (Tpeev is HL) and (Tprop_(k-1) is LH) then

$$T_{prop} = 0,01453 \cdot FQ101 + 0,21100 \cdot FQ201 + 0,7455 \cdot Tpeev - 0,194 \cdot T_{prop_{(k-1)}} - 0,00741$$

FR²: If (FQ101 is HL) and (FQ201 is HH) and (Tpeev is LL) and (Tprop_(k-1) is LM) then

$$T_{prop} = -0,00242 \cdot FQ101 + 0,34260 \cdot FQ201 + 0,6507 \cdot Tpeev - 2,444 \cdot T_{prop_{(k-1)}} + 0,04882$$

FR³: If (FQ101 is HM) and (FQ201 is LL) and (Tpeev is LH) and (Tprop_(k-1) is LL) then

$$T_{prop} = 0,02552 \cdot FQ101 + 0,20530 \cdot FQ201 + 0,6902 \cdot Tpeev - 2,018 \cdot T_{prop_{(k-1)}} + 0,01649$$

FR⁴: If (FQ101 is LM) and (FQ201 is LM) and (Tpeev is HM) and (Tprop_(k-1) is HL) then

$$T_{prop} = 0,01027 \cdot FQ101 + 0,01952 \cdot FQ201 + 0,9715 \cdot Tpeev - 0,564 \cdot T_{prop_{(k-1)}} + 0,00636$$

FR⁵: If (FQ101 is LL) and (FQ201 is HL) and (Tpeev is HH) and (Tprop_(k-1) is HH) then

$$T_{prop} = -0,15500 \cdot FQ101 + 0,40750 \cdot FQ201 + 0,5141 \cdot Tpeev + 7,997 \cdot T_{prop_{k-1}} - 0,04477$$

FR⁶: If (FQ101 is HH) and (FQ201 is HM) and (Tpeev is LM) and (Tprop_(k-1) is HM) then

$$T_{prop} = -3,3010 \cdot FQ101 + 0,55280 \cdot FQ201 + 0,3054 \cdot Tpeev + 172,900 \cdot T_{prop_{(k-1)}} - 0,57320$$

E.2 Modelos Takagi-Sugeno para o sistema de refrigeração contendo um compressor semi-hermético

E.2a Representação explícita baseada nos consequentes das regras

fuzzy, do modelo Takagi-Sugeno TS^{Te}_{FQ101} , $Te_i =$

$$q_{i1} + q_{i2} + q_{i3} + q_{i4} + q_{i5} + q_{i0}$$

FR¹: If (FQ101_(k-1) is HL) and (FQ101_(k-2) is HL) and (FQ101_(k-3) is HL) and (Te_(k-1) is HL) and (Te_(k-2) is HM) then

$$Te_1 = -78,335 \times 10^{-2} \cdot FQ101_{(k-1)} + 149,827 \times 10^{-2} \cdot FQ101_{(k-2)} - 43,019 \times 10^{-2} \cdot FQ101_{(k-3)} - 16,741 \times 10^{-2} \cdot Te_{(k-1)} + 91,239 \times 10^{-2} \cdot Te_{(k-2)} - 108,261 \times 10^{-2}$$

FR²: If (FQ101_(k-1) is LM) and (FQ101_(k-2) is LM) then

$$Te_2 = -0,700 \times 10^{-2} \cdot FQ101_{(k-1)} - 1,803 \times 10^{-2} \cdot FQ101_{(k-2)} + 1,835 \times 10^{-2} \cdot FQ101_{(k-3)} + 55,925 \times 10^{-2} \cdot Te_{(k-1)} + 41,310 \times 10^{-2} \cdot Te_{(k-2)} + 8,110 \times 10^{-2}$$

FR³: If (FQ101_(k-1) is M) and (FQ101_(k-2) is M) and (FQ101_(k-3) is M) and (Te_(k-1) is HM) and (Te_(k-2) is HL) then

$$Te_3 = 28,937 \times 10^{-2} \cdot FQ101_{(k-1)} - 90,367 \times 10^{-2} \cdot FQ101_{(k-2)} + 72,283 \times 10^{-2} \cdot FQ101_{(k-3)} + 22,549 \times 10^{-2} \cdot Te_{(k-1)} + 53,374 \times 10^{-2} \cdot Te_{(k-2)} + 102,881 \times 10^{-2}$$

FR⁴: If (FQ101_(k-3) is LM) then

$$Te_4 = -0,883 \times 10^{-2} \cdot FQ101_{(k-1)} + 1,081 \times 10^{-2} \cdot FQ101_{(k-2)} - 0,104 \times 10^{-2} \cdot FQ101_{(k-3)} + 155,741 \times 10^{-2} \cdot Te_{(k-1)} - 58,552 \times 10^{-2} \cdot Te_{(k-2)} + 9,463 \times 10^{-2}$$

FR⁵: If (FQ101_(k-1) is HM) and (FQ101_(k-2) is HM) and (FQ101_(k-3) is HM) and (Te_(k-1) is M) and (Te_(k-2) is M) then

$$Te_5 = 1,537 \times 10^{-2} \cdot FQ101_{(k-1)} - 4,108 \times 10^{-2} \cdot FQ101_{(k-2)} + 2,557 \times 10^{-2} \cdot FQ101_{(k-3)} + 104,013 \times 10^{-2} \cdot Te_{(k-1)} - 3,890 \times 10^{-2} \cdot Te_{(k-2)} - 0,696 \times 10^{-2}$$

E.2b Representação explícita baseada nos consequentes das regras

fuzzy, do modelo Takagi-Sugeno $TS^{Tp_{FQ101}}$, $Tp_i =$

$$q_{i1} + q_{i2} + q_{i3} + q_{i4} + q_{i5} + q_{i0}$$

FR^1 : If $(FQ101_{(k-1)} \text{ is HL})$ and $(FQ101_{(k-2)} \text{ is HL})$ and $(FQ101_{(k-3)} \text{ is HL})$ and $(Tp_{(k-2)} \text{ is HL})$ then

$$Tp_1 = 0,862 \times 10^{-2} \cdot FQ101_{(k-1)} - 0,707 \times 10^{-2} \cdot FQ101_{(k-2)} + 67,202 \times 10^{-2} \cdot FQ101_{(k-3)} + 33,879 \times 10^{-2} \cdot Tp_{(k-1)} - 3,511 \times 10^{-2} \cdot Tp_{(k-2)} + 0,036 \times 10^{-2}$$

FR^2 : If $(Tp_{(k-1)} \text{ is HL})$ then

$$Tp_2 = -0,009 \times 10^{-2} \cdot FQ101_{(k-1)} - 0,055 \times 10^{-2} \cdot FQ101_{(k-2)} + 90,765 \times 10^{-2} \cdot FQ101_{(k-3)} + 9,139 \times 10^{-2} \cdot Tp_{(k-1)} + 0,192 \times 10^{-2} \cdot Tp_{(k-2)} - 0,0912 \times 10^{-2}$$

FR^3 : If $(FQ101_{(k-1)} \text{ is LM})$ and $(FQ101_{(k-2)} \text{ is M})$ and $(FQ101_{(k-3)} \text{ is M})$ and $(Tp_{(k-1)} \text{ is HL})$ and $(Tp_{(k-2)} \text{ is HM})$ then

$$Tp_3 = -0,547 \times 10^{-2} \cdot FQ101_{(k-1)} + 0,892 \times 10^{-2} \cdot FQ101_{(k-2)} + 103,053 \times 10^{-2} \cdot FQ101_{(k-3)} - 22,349 \times 10^{-2} \cdot Tp_{(k-1)} + 29,339 \times 10^{-2} \cdot Tp_{(k-2)} + 0,073 \times 10^{-2}$$

FR^4 : If $(FQ101_{(k-1)} \text{ is HM})$ and $(FQ101_{(k-2)} \text{ is HM})$ and $(FQ101_{(k-3)} \text{ is HM})$ then

$$Tp_4 = -0,048 \times 10^{-2} \cdot FQ101_{(k-1)} - 0,729 \times 10^{-2} \cdot FQ101_{(k-2)} + 75,876 \times 10^{-2} \cdot FQ101_{(k-3)} + 20,250 \times 10^{-2} \cdot Tp_{(k-1)} + 8,436 \times 10^{-2} \cdot Tp_{(k-2)} - 0,235 \times 10^{-2}$$

FR^5 : If $(FQ101_{(k-1)} \text{ is M})$ and $(FQ101_{(k-2)} \text{ is LM})$ and $(FQ101_{(k-3)} \text{ is LM})$ and $(Tp_{(k-1)} \text{ is HM})$ and $(Tp_{(k-2)} \text{ is HH})$ then

$$Tp_5 = -0,189 \times 10^{-2} \cdot FQ101_{(k-1)} - 0,058 \times 10^{-2} \cdot FQ101_{(k-2)} + 94,478 \times 10^{-2} \cdot FQ101_{(k-3)} - 2,577 \times 10^{-2} \cdot Tp_{(k-1)} + 13,195 \times 10^{-2} \cdot Tp_{(k-2)} - 0,030 \times 10^{-2}$$

FR^6 : If $(Tp_{(k-1)} \text{ is HH})$ and $(Tp_{(k-2)} \text{ is M})$ then

$$Tp_6 = -49,351 \times 10^{-2} \cdot FQ101_{(k-1)} + 51,435 \times 10^{-2} \cdot FQ101_{(k-2)} + 300,506 \times 10^{-2} \cdot FQ101_{(k-3)} - 288,440 \times 10^{-2} \cdot Tp_{(k-1)} + 78,672 \times 10^{-2} \cdot Tp_{(k-2)} - 7,062 \times 10^{-2}$$

E.2c Representação explícita baseada nos consequentes das regras

fuzzy, do modelo Takagi-Sugeno TS^{Te}_{FQ201} , $Te_i = q_{i1} + q_{i2} + q_{i3} + q_{i4} + q_{i5} + q_{i6}$

FR¹: If (FQ201_(k-1) is LL) and (FQ201_(k-2) is LL) and (FQ201_(k-3) is LL) and (Te_(k-1) is LM) and (Te_(k-2) is LH) then

$$Te_1 = -0,344 \times 10^{-2} \cdot FQ201_{(k-1)} + 0,411 \times 10^{-2} \cdot FQ201_{(k-2)} - 1,114 \times 10^{-2} \cdot FQ101_{(k-3)} + 135,768 \times 10^{-2} \cdot Te_{(k-1)} - 37,751 \times 10^{-2} \cdot Te_{(k-2)} - 37,752 \times 10^{-2}$$

FR²: If (FQ201_(k-1) is LH) and (FQ201_(k-2) is LH) and (FQ201_(k-3) is LH) and (Te_(k-1) is LH) and (Te_(k-2) is LH) then

$$Te_2 = 0,100 \times 10^{-2} \cdot FQ201_{(k-1)} - 0,954 \times 10^{-2} \cdot FQ201_{(k-2)} - 0,367 \times 10^{-2} \cdot FQ101_{(k-3)} + 136,521 \times 10^{-2} \cdot Te_{(k-1)} - 38,509 \times 10^{-2} \cdot Te_{(k-2)} - 22,201 \times 10^{-2}$$

FR³: If (FQ201_(k-1) is HL) and (FQ201_(k-2) is HL) and (FQ201_(k-3) is HL) and (Te_(k-1) is HL) and (Te_(k-2) is HL) then

$$Te_3 = -1,905 \times 10^{-2} \cdot FQ201_{(k-1)} + 0,799 \times 10^{-2} \cdot FQ201_{(k-2)} - 0,053 \times 10^{-2} \cdot FQ101_{(k-3)} + 196,748 \times 10^{-2} \cdot Te_{(k-1)} - 100,485 \times 10^{-2} \cdot Te_{(k-2)} + 11,130 \times 10^{-2}$$

FR⁴: If (FQ201_(k-1) is HH) and (FQ201_(k-2) is HH) and (FQ201_(k-3) is HH) and (Te_(k-1) is M) and (Te_(k-2) is M) then

$$Te_4 = -0,188 \times 10^{-2} \cdot FQ201_{(k-1)} - 21,936 \times 10^{-2} \cdot FQ201_{(k-2)} + 21,003 \times 10^{-2} \cdot FQ101_{(k-3)} + 178,909 \times 10^{-2} \cdot Te_{(k-1)} - 81,798 \times 10^{-2} \cdot Te_{(k-2)} + 11,301 \times 10^{-2}$$

FR⁵: If (FQ201_(k-1) is M) and (FQ201_(k-2) is M) and (FQ201_(k-3) is M) then

$$Te_5 = 0,585 \times 10^{-2} \cdot FQ201_{(k-1)} - 0,937 \times 10^{-2} \cdot FQ201_{(k-2)} - 0,363 \times 10^{-2} \cdot FQ101_{(k-3)} + 206,312 \times 10^{-2} \cdot Te_{(k-1)} - 107,262 \times 10^{-2} \cdot Te_{(k-2)} - 5,814 \times 10^{-2}$$

FR⁶: If (Te_(k-1) is HM) and (Te_(k-2) is HM) then

$$Te_6 = 0,015 \times 10^{-2} \cdot FQ201_{(k-1)} + 0,511 \times 10^{-2} \cdot FQ201_{(k-2)} - 0,058 \times 10^{-2} \cdot FQ101_{(k-3)} + 132,432 \times 10^{-2} \cdot Te_{(k-1)} - 28,845 \times 10^{-2} \cdot Te_{(k-2)} - 10,552 \times 10^{-2}$$

E.2d Representação explícita baseada nos consequentes das regras

fuzzy, do modelo Takagi-Sugeno TS^{Tp}_{FQ201} , $Tp_i =$

$$q_{i1} + q_{i2} + q_{i3} + q_{i4} + q_{i5} + q_{i0}$$

FR¹: If (FQ201_(k-1) is LL) and (Tp_(k-1) is M) and (Tp_(k-2) is M) then

$$Tp_1 = 2,819 \times 10^{-2} \cdot FQ201_{(k-1)} + 0,402 \times 10^{-2} \cdot FQ201_{(k-2)} - 0,262 \times 10^{-2} \cdot FQ101_{(k-3)} + 180,476 \times 10^{-2} \cdot Tp_{(k-1)} - 78,848 \times 10^{-2} \cdot Tp_{(k-2)} + 78,661 \times 10^{-2}$$

FR²: If (FQ201_(k-1) is HL) and (FQ201_(k-2) is HL) and (FQ201_(k-3) is HL) and (Tp_(k-1) is HM) and (Tp_(k-2) is HM) then

$$Tp_2 = 5,764 \times 10^{-2} \cdot FQ201_{(k-1)} - 5,118 \times 10^{-2} \cdot FQ201_{(k-2)} - 1,623 \times 10^{-2} \cdot FQ101_{(k-3)} + 160,586 \times 10^{-2} \cdot Tp_{(k-1)} - 60,571 \times 10^{-2} \cdot Tp_{(k-2)} - 7,966 \times 10^{-2}$$

FR³: If (FQ201_(k-1) is HH) and (FQ201_(k-2) is HH) and (FQ201_(k-3) is HH) and (Tp_(k-1) is LH) and (Tp_(k-2) is LH) then

$$Tp_3 = 0,974 \times 10^{-2} \cdot FQ201_{(k-1)} - 0,993 \times 10^{-2} \cdot FQ201_{(k-2)} + 0,025 \times 10^{-2} \cdot FQ101_{(k-3)} + 110,681 \times 10^{-2} \cdot Tp_{(k-1)} - 11,787 \times 10^{-2} \cdot Tp_{(k-2)} + 0,045 \times 10^{-2}$$

FR⁴: If (FQ201_(k-1) is LH) and (FQ201_(k-2) is LH) and (FQ201_(k-3) is LH) and (Tp_(k-1) is LM) and (Tp_(k-2) is LM) then

$$Tp_4 = -0,286 \times 10^{-2} \cdot FQ201_{(k-1)} + 3,419 \times 10^{-2} \cdot FQ201_{(k-2)} - 5,034 \times 10^{-2} \cdot FQ101_{(k-3)} + 147,972 \times 10^{-2} \cdot Tp_{(k-1)} - 51,965 \times 10^{-2} \cdot Tp_{(k-2)} - 22,359 \times 10^{-2}$$

FR⁵: If (FQ201_(k-2) is LL) and (FQ201_(k-3) is LL) then

$$Tp_5 = 0,171 \times 10^{-2} \cdot FQ201_{(k-1)} - 0,272 \times 10^{-2} \cdot FQ201_{(k-2)} - 1,751 \times 10^{-2} \cdot FQ101_{(k-3)} + 154,106 \times 10^{-2} \cdot Tp_{(k-1)} - 53,802 \times 10^{-2} \cdot Tp_{(k-2)} - 51,603 \times 10^{-2}$$

ANEXO I: Informações complementares dos equipamentos do sistema de refrigeração

A.I.1 – Compressor Bitzer série octagon



Einsatzgrenzen

bezogen auf 20°C Sauggastemperatur

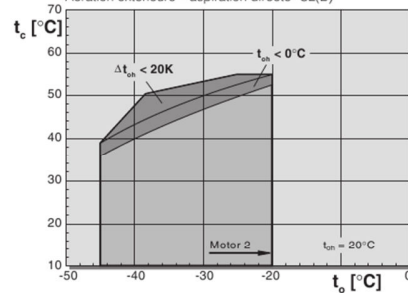
Application limits

relating to 20°C suction gas temperature

Limites d'application

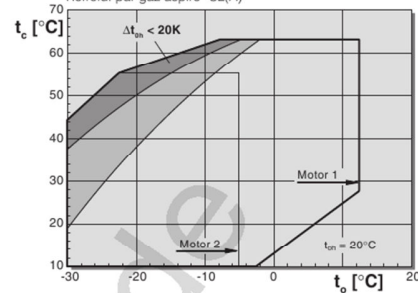
se référant à une température de gaz aspiré de 20°C

R22 VARICOOOL 2KC-05.2 .. 4DC-5.2*
Luftkühlung – direkt ansaugend "SL(B)"
Air cooling – direct suction "SL(B)"
Aération extérieure – aspiration directe "SL(B)"



* Einsatzgrenzen für 4CC-6.2 auf Anfrage

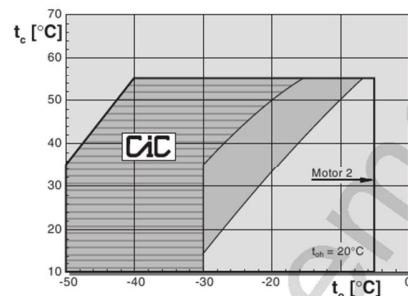
R22 VARICOOOL 2KC-05.2 .. 4CC-9.2
Sauggaskühlung "SL(A)"
Suction gas cooling "SL(A)"
Refroid. par gaz aspiré "SL(A)"



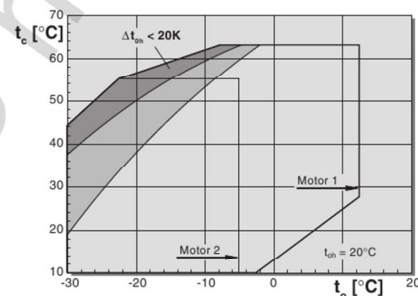
* Application limits 4CC-6.2 upon request

* Limites d'application 4CC-6.2 sur demande

R22 4VCS-6.2 .. 6F-40.2
mit / with / avec **CiC**



R22 4VCS-6.2 .. 8FC-70.2 ①



t_e Verdampfungstemperatur (°C)
 t_{gh} Sauggastemperatur (°C)
 Δt_{gh} Sauggas-Überhitzung (K)
 t_c Verflüssigungstemperatur (°C)
Zusatzkühlung
Zusatzkühlung + eingeschränkte Sauggastemperatur
Zusatzlüfter + **CiC**

t_e Evaporating temperature (°C)
 t_{gh} Suction gas temperature (°C)
 Δt_{gh} Suction superheat (K)
 t_c Condensing temperature (°C)
Additional cooling
Additional cooling & limited suction gas temperature
Additional fan + **CiC**

t_e Température d'évaporation (°C)
 t_{gh} Température de gaz aspiré (°C)
 Δt_{gh} Surchauffe à l'aspiration (K)
 t_c Température de condensation (°C)
Refroid. additionnel réduite
Refroid. additionnel + température de gaz aspiré limitée
Ventilation + **CiC**



R22

Leistungswerte 50 Hzbezogen auf Sauggastemperatur 20°C,
ohne Flüssigkeits-Unterkühlung**Performance data 50 Hz**relating to 20°C suction gas tempera-
ture, without liquid subcooling**Données de puissance 50 Hz**à une température de gaz aspiré de 20°C
se référant, sans sous-refroidissement de
liquide

Verdichter Typ	Verfl. Temp.	Compressor type	Cond. temp.	Comprimeur type	Temp. de cond.	Kälteleistung Cooling capacity Puissance frigorifique	Q ₀	[Watt]	Leistungsaufnahme Power consumption Puissance absorbée	P _e	[kW]							
						Verdampfungs- temperatur °C	Evaporating temperature °C	Température d'évaporation °C										
						12.5	10	7.5	5	0	-5	-10	-15	-20	-25	-30	-35	-40
2KC-05.2	30	Q	P	Q	P	5550	5070	4610	4190	3420	2760	2180	1680	1460	1120	835	600	410
	40	Q	P	Q	P	0.78	0.79	0.80	0.80	0.80	0.78	0.75	0.70	0.63	0.56	0.48	0.39	0.31
	50	Q	P	Q	P	4860	4430	4020	3640	2960	2370	1850	1400	1270	955	700	490	315
2JC-07.2	30	Q	P	Q	P	1.01	1.01	1.00	0.99	0.95	0.90	0.83	0.76	0.71	0.61	0.50	0.40	0.31
	40	Q	P	Q	P	4220	3840	3480	3150	2540	2020	1560	1160	1090	820	590	400	
	50	Q	P	Q	P	1.22	1.20	1.18	1.15	1.08	1.00	0.91	0.81	0.78	0.65	0.54	0.42	
2HC-1.2	30	Q	P	Q	P	6780	6210	5670	5170	4280	3500	2820	2230	1900	1460	1100	795	550
	40	Q	P	Q	P	0.94	0.95	0.96	0.96	0.95	0.93	0.90	0.85	0.81	0.73	0.64	0.55	0.46
	50	Q	P	Q	P	5950	5450	4970	4530	3730	3030	2420	1900	1650	1250	920	645	425
2HC-2.2	30	Q	P	Q	P	1.22	1.21	1.20	1.19	1.15	1.10	1.03	0.95	0.91	0.80	0.68	0.56	0.45
	40	Q	P	Q	P	5170	4730	4310	3920	3210	2590	2050	1590	1420	1070	770	530	
	50	Q	P	Q	P	1.50	1.48	1.45	1.42	1.34	1.25	1.15	1.04	1.00	0.86	0.72	0.58	
2GC-2.2	30	Q	P	Q	P	8600	7880	7210	6590	5470	4490	3640	2910	2290	1750	1300		
	40	Q	P	Q	P	1.21	1.22	1.22	1.22	1.20	1.17	1.12	1.06	0.98	0.88	0.76		
	50	Q	P	Q	P	7530	6900	6310	5760	4770	3910	3160	2510	1950	1470	1070		
2FC-3.2	30	Q	P	Q	P	1.56	1.55	1.54	1.52	1.47	1.40	1.32	1.21	1.09	0.95	0.78		
	40	Q	P	Q	P	6540	5990	5480	5000	4130	3380	2720	2150	1650	1230			
	50	Q	P	Q	P	1.92	1.89	1.86	1.82	1.73	1.62	1.50	1.35	1.19	1.00			
2EC-2.2	30	Q	P	Q	P	10020	9190	8420	7690	6390	5260	4280	3430	2960	2320	1790	1340	960
	40	Q	P	Q	P	1.32	1.33	1.36	1.36	1.37	1.36	1.33	1.29	1.24	1.14	1.03	0.89	0.75
	50	Q	P	Q	P	8790	8060	7380	6750	5600	4600	3730	2980	2600	2010	1510	1100	760
2FC-2.2	30	Q	P	Q	P	1.76	1.75	1.74	1.73	1.69	1.63	1.56	1.46	1.37	1.24	1.08	0.92	0.73
	40	Q	P	Q	P	7650	7020	6420	5870	4870	3990	3230	2570	2260	1720	1270	890	
	50	Q	P	Q	P	2.17	2.14	2.11	2.07	1.98	1.87	1.75	1.60	1.49	1.30	1.11	0.93	
2EC-3.2	30	Q	P	Q	P	11990	11010	10100	9240	7700	6370	5210	4210	3340	2610	1980		
	40	Q	P	Q	P	1.68	1.69	1.70	1.71	1.69	1.66	1.61	1.53	1.43	1.31	1.16		
	50	Q	P	Q	P	10620	9750	8930	8170	6790	5590	4540	3640	2870	2200	1640		
2DC-2.2	30	Q	P	Q	P	2.21	2.20	2.18	2.15	2.09	2.00	1.89	1.76	1.60	1.42	1.22		
	40	Q	P	Q	P	9290	8510	7790	7110	5890	4820	3890	3090	2400	1820			
	50	Q	P	Q	P	2.73	2.69	2.64	2.59	2.46	2.31	2.14	1.95	1.73	1.49			
2CC-3.2	30	Q	P	Q	P	7590	6190	4990	4340	3430	2860	2280	1750	1300				
	40	Q	P	Q	P	2.06	2.06	2.06	2.06	2.06	2.06	2.06	2.06	2.06	2.06	2.06	2.06	2.06
	50	Q	P	Q	P	6650	5370	4270	3610	2860	2370	1880	1390	985				
2EC-2.2	30	Q	P	Q	P	2.42	2.41	2.39	2.37	2.34	2.24	2.11	1.99	1.81	1.61	1.46		
	40	Q	P	Q	P	5680	4520	3520	2860	2280	1880	1390	985					
	50	Q	P	Q	P	2.71	2.62	2.52	2.42	2.34	2.19	2.02	1.82	1.56	1.28			
2DC-3.2	30	Q	P	Q	P	14380	13200	12090	11060	9210	7600	6200	4990	3950	3070	2310		
	40	Q	P	Q	P	1.76	1.87	1.96	2.00	2.05	2.02	1.94	1.82	1.67	1.52	1.37		
	50	Q	P	Q	P	12640	11760	10760	9830	8130	6660	5380	4280	3320	2510	1810		
2CC-4.2	30	Q	P	Q	P	2.53	2.56	2.56	2.55	2.48	2.35	2.18	1.99	1.80	1.61	1.46		
	40	Q	P	Q	P	11260	10290	9380	8530	7000	5670	4510	3510	2640	1910			
	50	Q	P	Q	P	3.19	3.15	3.09	3.01	2.83	2.61	2.37	2.13	1.91	1.71			
2DC-4.2	30	Q	P	Q	P	17280	15860	14530	13290	11060	9120	7440	5990	4740	3670	2770		
	40	Q	P	Q	P	2.01	2.14	2.24	2.31	2.36	2.33	2.24	2.09	1.92	1.74	1.56		
	50	Q	P	Q	P	15400	14110	12910	11780	9750	7980	6450	5120	3970	3000	2160		
2CC-3.2	30	Q	P	Q	P	2.89	2.92	2.93	2.92	2.84	2.69	2.50	2.28	2.06	1.86	1.70		
	40	Q	P	Q	P	13490	12320	11230	10220	8380	6780	5390	4190	3160	2270			
	50	Q	P	Q	P	3.64	3.59	3.52	3.44	3.23	2.98	2.72	2.45	2.20	2.00			
2CC-3.2	30	Q	P	Q	P	11350	9290	7500	6390	5040	4340	3430	2650	1990	1440			
	40	Q	P	Q	P	2.85	2.74	2.56	2.40	2.15	2.00	1.82	1.62	1.42	1.24			
	50	Q	P	Q	P	9880	8010	6380	5400	4160	3320	2510	1810					
2CC-4.2	30	Q	P	Q	P	3.32	3.07	2.79	2.56	2.27	2.06	1.86	1.70					
	40	Q	P	Q	P	8370	6680	5230	4450	3340	2660	1960	1390					
	50	Q	P	Q	P	3.73	3.39	3.04	2.79	2.46	2.19	1.90						
4FC-3.2	30	Q	P	Q	P	21400	19650	18020	16490	13750	11360	9290	7510	5970	4660	3550		
	40	Q	P	Q	P	2.48	2.63	2.74	2.83	2.91	2.88	2.78	2.61	2.40	2.17	1.93		
	50	Q	P	Q	P	18960	17380	15910	14540	12050	9890	8020	6390	5000	3800	2790		
4FC-3.2	30	Q	P	Q	P	3.67	3.69	3.68	3.64	3.51	3.31	3.06	2.79	2.51	2.24	2.01		
	40	Q	P	Q	P	16490	15080	13760	12520	10290	8350	6670	5210	3960	2880			
	50	Q	P	Q	P	4.61	4.51	4.40	4.27	3.99	3.67	3.33	3.01	2.72	2.47			
4FC-3.2	30	Q	P	Q	P	12760	10380	8310	7070	5540	4260	3190	2300					
	40	Q	P	Q	P	3.25	3.07	2.86	2.68	2.43	2.17	1.93	1.71					
	50	Q	P	Q	P	11220	9030	7140	6010	4650	3510	2560	1790					
4FC-3.2	30	Q	P	Q	P	3.78	3.48	3.16	2.96	2.62	2.28	1.97	1.70					
	40	Q	P	Q	P	9650	7670	5950	4960	3770	2770	1940						
	50	Q	P	Q	P	4.22	3.82	3.42	3.25	2.88	2.52	2.13						

22

KP-100-6

ANEXO I: Informações complementares dos equipamentos do sistema de refrigeração

R22



Leistungswerte 50 Hz

bezogen auf Sauggastemperatur 20°C,
ohne Flüssigkeits-Unterkühlung

Performance data 50 Hz

relating to 20°C suction gas tempera-
ture, without liquid subcooling

Données de puissance 50 Hz

à une température de gaz aspiré de 20°C
se référant, sans sous-refroidissement de
liquide

Verdichter Typ Compressor type Compresseur type	Verf. Temp. Cond. temp. Temp. de cond. °C	Kälteleistung Cooling capacity Puissance frigorifique					Q ₀	[Watt]	Leistungsaufnahme Power consumption Puissance absorbée					P _e	[kW]			
		Verdampfungs-temperatur °C					Evaporating temperature °C					Température d'évaporation °C						
		12.5	10	7.5	5	0	-5	-10	-15	-20	-25	-30	-35	-40				
4FC-5.2	30	Q	24400	22350	20500	18720	15540	12780	10390	8320	6550	5030	3740					
		P	2.84	2.97	3.06	3.13	3.17	3.12	2.99	2.80	2.57	2.32	2.07					
	40	Q	21800	19960	18250	16650	13750	11230	9040	7150	5530	4130	2950					
4EC-4.2	30	Q	4.00	4.02	4.02	3.99	3.86	3.66	3.40	3.11	2.80	2.49	2.21					
		P	19180	17530	15980	14530	11920	9640	7660	5950	4480	3220	2.67					
	50	Q	5.00	4.93	4.84	4.72	4.45	4.12	3.76	3.39	3.02	2.67						
4EC-6.2	30	Q	29950	27500	25200	23050	19160	15800	12880	10360	8200	6350	4780					
		P	3.43	3.64	3.79	3.90	3.98	3.91	3.73	3.47	3.17	2.86	2.58					
	40	Q	26750	24500	22400	20450	16930	13860	11190	8890	6910	5210	3770					
4DC-5.2	30	Q	4.97	5.03	5.03	5.00	4.83	4.56	4.22	3.84	3.46	3.12	2.84					
		P	23450	21450	19570	17810	14630	11850	9440	7350	5560	4020						
	50	Q	6.31	6.22	6.09	5.94	5.56	5.12	4.65	4.19	3.77	3.43						
4DC-7.2	30	Q	5.11	5.14	5.14	5.11	4.94	4.68	4.34	3.92	3.57	3.22	2.90					
		P	19140	15800	12540	10300	8110	6260	4690	3380								
	40	Q	4.77	4.51	4.21	3.93	3.62	3.27	2.91	2.55								
4CC-6.2	30	Q	5.56	5.14	4.70	4.35	3.92	3.49	3.05	2.62								
		P	14480	11560	9020	7280	5570	4120	2920	2000								
	50	Q	5.22	5.09	4.82	4.45	4.08	3.72	3.36	3.00								
4CC-9.2	30	Q	36400	33400	30600	28000	23250	19160	15610	12540	10300	8110	6260	4690	3380			
		P	4.21	4.37	4.49	4.57	4.63	4.56	4.40	4.15	3.85	3.51	3.15					
	40	Q	32500	29750	27200	24850	20550	16830	13600	10800	8400	6340	4590					
4VCS-6.2	30	Q	5.83	5.86	5.86	5.82	5.66	5.40	5.06	4.67	4.24	3.80	3.36					
		P	28500	26100	23800	21700	17830	14480	11560	9030	6850	4970						
	50	Q	7.28	7.19	7.07	6.93	6.57	6.14	5.65	5.13	4.61	4.09						
4VCS-10.2	30	Q	5.66	5.66	5.66	5.66	5.66	5.66	5.66	5.66	5.66	5.66	5.66					
		P	22950	18740	15120	12000	9340	7070										
	40	Q	5.76	5.48	5.16	4.80	4.39	3.91										
4TCS-8.2	30	Q	22950	16410	13090	10230	7780	5700										
		P	6.62	6.18	5.72	5.22	4.68	4.09										
	40	Q	17510	14010	10990	8390	6160											
4TCS-12.2	30	Q	7.50	6.91	6.30	5.67	5.00											
		P	22950	18740	15120	12000	9340	7060										
	40	Q	5.50	5.69	5.82	5.90	5.92	5.78	5.53	5.18	4.77	4.34	3.93					
4PCS-10.2	30	Q	38900	35650	32600	29800	24700	20250	16420	13100	10240	7790	5710					
		P	7.45	7.42	7.36	7.26	7.00	6.64	6.21	5.72	5.20	4.66	4.13					
	40	Q	34250	31350	28650	26100	21500	17500	14010	10990	8380	6150						
4PCS-15.2	30	Q	9.27	9.05	8.82	8.57	8.06	7.50	6.92	6.30	5.66	4.99						
		P	43300	39750	36450	33350	27800	22950	18740	15120	12000	9330	7060					
	40	Q	5.50	5.69	5.82	5.90	5.92	5.78	5.53	5.18	4.77	4.34	3.93					
4PCS-18.2	30	Q	38900	35650	32600	29800	24700	20250	16420	13100	10240	7790	5710					
		P	7.45	7.42	7.36	7.26	7.00	6.64	6.21	5.72	5.20	4.66	4.13					
	40	Q	34250	31350	28650	26100	21500	17500	14010	10990	8380	6150						
4PCS-21.2	30	Q	9.27	9.05	8.82	8.57	8.06	7.50	6.92	6.30	5.66	4.99						
		P	43300	39750	36450	33350	27800	22950	18740	15120	12000	9330	7060					
	40	Q	5.50	5.69	5.82	5.90	5.92	5.78	5.53	5.18	4.77	4.34	3.93					
4PCS-24.2	30	Q	38900	35650	32600	29800	24700	20250	16420	13100	10240	7790	5710					
		P	7.45	7.42	7.36	7.26	7.00	6.64	6.21	5.72	5.20	4.66	4.13					
	40	Q	34250	31350	28650	26100	21500	17500	14010	10990	8380	6150						
4PCS-27.2	30	Q	9.27	9.05	8.82	8.57	8.06	7.50	6.92	6.30	5.66	4.99						
		P	43300	39750	36450	33350	27800	22950	18740	15120	12000	9330	7060					
	40	Q	5.50	5.69	5.82	5.90	5.92	5.78	5.53	5.18	4.77	4.34	3.93					
4PCS-30.2	30	Q	38900	35650	32600	29800	24700	20250	16420	13100	10240	7790	5710					
		P	7.45	7.42	7.36	7.26	7.00	6.64	6.21	5.72	5.20	4.66	4.13					
	40	Q	34250	31350	28650	26100	21500	17500	14010	10990	8380	6150						
4PCS-33.2	30	Q	9.27	9.05	8.82	8.57	8.06	7.50	6.92	6.30	5.66	4.99						
		P	43300	39750	36450	33350	27800	22950	18740	15120	12000	9330	7060					
	40	Q	5.50	5.69	5.82	5.90	5.92	5.78	5.53	5.18	4.77	4.34	3.93					
4PCS-36.2	30	Q	38900	35650	32600	29800	24700	20250	16420	13100	10240	7790	5710					
		P	7.45	7.42	7.36	7.26	7.00	6.64	6.21	5.72	5.20	4.66	4.13					
	40	Q	34250	31350	28650	26100	21500	17500	14010	10990	8380	6150						
4PCS-39.2	30	Q	9.27	9.05	8.82	8.57	8.06	7.50	6.92	6.30	5.66	4.99						
		P	43300	39750	36450	33350	27800	22950	18740	15120	12000	9330	7060					
	40	Q	5.50	5.69	5.82	5.90	5.92	5.78	5.53	5.18	4.77	4.34	3.93					
4PCS-42.2	30	Q	38900	35650	32600	29800	24700	20250	16420	13100	10240	7790	5710					
		P	7.45	7.42	7.36	7.26	7.00	6.64	6.21	5.72	5.20	4.66	4.13					
	40	Q	34250	31350	28650	26100	21500	17500	14010	10990	8380	6150						
4PCS-45.2	30	Q	9.27	9.05	8.82	8.57	8.06	7.50	6.92	6.30	5.66	4.99						
		P	43300	39750	36450	33350	27800	22950	18740	15120	12000	9330	7060					
	40	Q	5.50	5.69	5.82	5.90	5.92	5.78	5.53	5.18	4.77	4.34	3.93					
4PCS-48.2	30	Q	38900	35650	32600	29800	24700	20250	16420	13100	10240	7790	5710					
		P	7.45	7.42	7.36	7.26	7.00	6.64	6.21	5.72	5.20	4.66	4.13					
	40	Q	34250	31350	28650	26100	21500	17500	14010	10990	8380	6150						
4PCS-51.2	30	Q	9.27	9.05	8.82	8.57	8.06	7.50	6.92	6.30	5.66	4.99						
		P	43300	39750	36450	33350	27800	22950	18740	15120	12000	9330	7060					
	40	Q	5.50	5.69	5.82	5.90	5.92	5.78	5.53	5.18	4.77	4.34	3.93					
4PCS-54.2	30	Q	38900	35650	32600	29800	24700	20250	16420	13100	10240	7790	5710					
		P	7.45	7.42	7.36	7.26	7.00	6.64	6.21	5.72	5.20	4.66	4.13					
	40	Q	34250	31350	28650	26100	21500	17500	14010	10990	8380	6150						
4PCS-57.2	30	Q	9.27	9.05	8.82	8.57	8.06	7.50	6.92	6.30	5.66	4.99						
		P	43300	39750	36450	33350	27800	22950	18740	15120	12000	9330	7060					
	40	Q	5.50	5.69	5.82	5.90	5.92	5.78	5.53	5.18	4.77	4.34	3.93					
4PCS-60.2	30	Q	38900	35650	32600	29800	24700	20250	16420	13100	10240	7790	5710					
		P	7.45	7.42	7.36	7.26	7.00	6.64	6.21	5.72	5.20	4.66	4.13					
	40	Q	34250	31350	28650	26100	21500	17500	14010	10990	8380	6150						
4PCS-63.2	30	Q	9.27	9.05	8.82	8.57	8.06	7.50	6.92	6.30	5.66	4.99						
		P	43300	39750	36450	33350	27800	22950	18740	15120	12000	9330	7060					
	40	Q	5.50	5.69	5.82	5.90	5.92	5.78	5.53	5.18	4.77	4.34	3.93					
4PCS-66.2	30	Q	38900	35650	32600	29800	24700	20250	16420	13100	10240	7790	5710					
		P	7.45	7.42	7.36	7.26	7.00	6.64	6.21	5.72	5.20	4.66	4.13					
	40	Q	34250	31350	28650	26100	21500	17500	14010	10990	8380	6150						
4PCS-69.2	30	Q	9.27	9.05	8.82	8.57	8.06	7.50	6.92	6.30	5.66	4.99						
		P	43300	39750	36450	33350	27800	22950	18740	15120	12000	9330	7060					

① und ② siehe Seite 25

③ Einsatzgrenzen für Direktansaugung "SL(B)"
auf Anfrage

④ and ⑤ refer to page 25

⑥ Application limits for direct suction "SL(B)" upon
request

④ et ⑤ voir page 25

⑥ Limites d'application pour aspiration directe "SL(B)"
sur demande

KP-100-6

23

**R22****Leistungswerte 50 Hz**bezogen auf Sauggasatemperatur 20°C,
ohne Flüssigkeits-Unterkühlung**Performance data 50 Hz**relating to 20°C suction gas tempera-
ture, without liquid subcooling**Données de puissance 50 Hz**à une température de gaz aspiré de 20°C
se référant, sans sous-refroidissement de
liquide

Verdichter Typ	Verf. Temp.	Kälteleistung Cooling capacity Puissance frigorifique										Leistungsaufnahme Power consumption Puissance absorbée										P _e	[kW]																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
Compressor type	Cond. temp.	Q ₀ [Watt]										P _e [kW]																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																													
Compresseur type	de cond. °C	Verdampfungs-temperatur °C										Evaporating temperature °C										Température d'évaporation °C																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
		12.5	10	7.5	5	0	-5	-10	-15	-20	-25	-30	-35	-40																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																											

R22

**Leistungswerte 50 Hz**

bezogen auf Sauggastemperatur 20°C,
ohne Flüssigkeits-Unterkühlung

Performance data 50 Hz

relating to 20°C suction gas tempera-
ture, without liquid subcooling

Données de puissance 50 Hz

à une température de gaz aspiré de 20°C
se référant, sans sous-refroidissement de
liquide

Verdichter Typ Compressor type Compresseur type	Verfl. Temp. Cond. temp. Temp. de cond. °C		Kälteleistung Cooling capacity Puissance frigorifique					Q_0	[Watt]	Leistungsaufnahme Power consumption Puissance absorbée					P_e	[kW]	
		↓	Verdampfungstemperatur °C					Evaporating temperature °C			Température d'évaporation °C						
			12.5	10	7.5	5	0	-5	-10	-15	-20	-25	-30	-35	-40		
6F-40.2	30	Q						106100	86800	70100	55900	43800	34000	25100	17600		
		P						27.40	25.50	23.50	21.20	18.92	17.07	14.95	12.96		
	40	Q						95300	77700	62600	49650	38700	29150	20900	13960		
6F-50.2	30	Q						85100	69200	55600	43600	33250	24450	17060	10890		
		P						36.40	33.50	30.40	27.04	23.71	20.21	16.60	12.94		
	40	Q	201400	184800	169400	155000	129100	106700	87300	70600	56300	44150	33900				
8GC-60.2	30	Q	31.90	31.40	30.80	30.20	28.70	27.10	25.30	23.30	21.20	18.97	16.66				
		P	181700	166700	152800	139800	116300	95900	78300	63100	50100	39050	29700				
	40	Q	37.60	36.90	36.10	35.20	33.30	31.30	29.00	26.60	24.00	21.30	18.44				
8FC-70.2	30	Q	163200	149700	137100	125300	104100	85700	69700	56000	44250	34250					
		P	43.00	42.10	41.10	40.10	37.90	35.50	32.80	29.90	26.80	23.50					
	40	Q	249700	230400	212400	195600	165300	139000	116100	96400	79500						
8GC-60.2	30	P	33.30	33.80	34.20	34.40	34.30	33.60	32.30	30.50	28.30						
		Q	225700	208300	192100	177000	149700	125900	105300	87500	61900						
	40	P	42.90	42.80	42.50	42.00	40.60	38.70	36.40	33.70	30.92						
8FC-70.2	30	Q	198700	183600	169400	156100	132100	111200	93000	66700	49000						
		P	51.70	50.90	49.90	48.80	46.20	43.40	40.60	38.09	36.08						
	40	Q	287900	265000	243500	223400	187100	155400	127800	103700	82800						
8FC-70.2	30	P	41.60	42.30	42.80	43.00	42.70	41.70	40.00	37.70	35.00						
		Q	259300	238500	218900	200700	167500	138500	113000	90800	71200						
	40	P	53.70	53.50	53.10	52.50	50.70	48.30	45.20	41.70	37.84						
8FC-70.2	30	Q	230200	211500	194000	177500	147600	121200	97900	77300	59100						
		P	64.40	63.40	62.20	60.90	57.70	53.90	49.70	45.22	40.48						

Leistungswerte der Tandem-Verdichter
siehe KP-110.

Performance data of the tandem compressors
see KP-110.

Données de puissance des compresseurs tandem
voir KP-110.

Leistungsdaten für individuelle Eingabewerte
und 60 Hz-Betrieb siehe BITZER Software.

Performance data for individual input data and
60 Hz operation see BITZER Software.

Données de puissance pour des données d'entrée
individuelles et fonctionnement à 60 Hz voir BITZER
Software.

- ② Daten auf Anfrage
③ Zusatzkühlung + max. Sauggas-Überhitzung 20 K
④ Dauerbetrieb wird bei diesen Bedingungen nicht empfohlen
- Zusatzkühlung oder eingeschränkte Sauggas-temperatur
■ VARICOOL-System
■ Zusatzlüfter + geänderte Saugventilposition "SL(B)"
■ Zusatzlüfter + -System

- ② Data upon request
③ Additional cooling & max. suction superheat 20 K
④ Continuous operation with these conditions is not recommended
- Additional cooling or limited suction gas temperature
■ VARICOOL-System
■ Additional fan & position of suction valve changed "SL(B)"
■ Additional fan & system; see page 5

- ② Données sur demande
③ Refroidissement additionnel + surchauffage à l'aspiration 20 K max.
④ Dans ces conditions, le fonctionnement continu n'est pas recommandé.
- Refroidissement additionnel ou température du gaz aspiré réduite
■ Système VARICOOL
■ ventilation additionnelle + position vanne d'aspiration modifiée "SL(B)"
■ Ventilation additionnelle + Système



Technische Daten

Technical data

Caractéristiques techniques

Verdichter Typ	Motor Version	Förder- volumen bei 1450 min ⁻¹	Anzahl der Zylinder	Öl- füllung	Gewicht	Rohranschlüsse		CR -Stufen-	Motor- Anschluss	Elektrische Daten		Anlauf- strom (Rotor blockiert)
Compressor type	Motor version	Displace- ment at 1450 min ⁻¹	Number of cylinders	Oil charge	Weight	DL Druckleitung mm Zoll	SL Saugleitung mm Zoll	CR -Steps-	Motor connection	Max. Betriebs- strom	Max. Leistungs- aufnahme	Starting current (locked rotor)
Com- presseur type	Version moteur	Volume balayé à 1450 min ⁻¹ m ³ /h	Nombre de cylindres	Charge d'huile dm ³	Poids kg	DL Conduite de ref. mm pouce	Raccords SL Conduite d'aspiration mm pouce	CR -Etages-	Raccordement de moteur Volt	Caractéristiques électriques Courant de service max. Amp. Ⓢ	Puissance absorbée max. kW Ⓢ	Courant de démarrage (Rotor bloqué) Amp. Ⓢ
2KC-05.2(Y)	1 + 2	4,06	2	1,0	43	12 1/2	16 5/8	-	Δ/Y	4,6/2,7	1,5	20,8/12
2JC-07.2(Y)	1 + 2	5,21	2	1,0	43	12 1/2	16 5/8	-		6,0/3,5	1,9	25,6/14,8
2HC-1.2(Y)	2	6,51	2	1,0	44	12 1/2	16 5/8	-		6,1/3,5	2,0	28,9/16,7
2HC-2.2(Y)	1				45					7,4/4,3	2,4	39/22,5
2GC-2.2(Y)	1 + 2	7,58	2	1,0	45	12 1/2	16 5/8	-		8,1/4,7	2,7	39/22,5
2FC-2.2(Y)	2	9,54	2	1,0	45	12 1/2	16 5/8	-		8,5/4,9	2,8	39/22,5
2FC-3.2(Y)	1				47					10,0/5,8	3,4	44,2/25,5
2EC-2.2(Y)	2	11,4	2	1,5	67,5					9,9/5,7	3,3	45/26
2EC-3.2(Y)	1				70,5					12,0/6,9	4,0	60,6/37
2DC-2.2(Y)	2				67,5					11,9/6,9	3,9	53,7/30,7
2DC-3.2(Y)	1	13,4	2	1,5	70,5	16 5/8	22 7/8	-	220..240 Δ/	13,5/7,8	4,5	64/37
2CC-3.2(Y)	2				70				380..420Y/3/50	14,8/8,5	5,0	64/37
2CC-4.2(Y)	1	16,2	2	1,5	70	16 5/8	22 7/8	-	265..290 Δ/	16,4/9,4	5,6	76,6/44,2
4FC-3.2(Y)	2				82				440..480Y/3/60	15,9/9,2	5,4	76,6/44,2
4FC-5.2(Y)	1	18,1	4	2,0	86	16 5/8	22 7/8	-		18,7/10,8	6,2	107,7/62,2
4EC-4.2(Y)	2				84					18,5/10,7	6,4	92,7/53,2
4EC-6.2(Y)	1	22,7	4	2,0	86	16 5/8	28 1 1/8	50		22,9/13,2	7,9	107,7/62,2
4DC-5.2(Y)	2				85,5					23,4/13,5	8,0	107,7/62,2
4DC-7.2(Y)	1	26,8	4	2,0	88,5	22 7/8	28 1 1/8	-		27,5/15,9	9,0	142,8/82,4
4CC-6.2(Y)	2				90,5					27,5/15,9	9,0	142,8/82,4
4CC-9.2(Y)	1	32,5	4	2,0	90,5	22 7/8	28 1 1/8	-		34,5/20,0	11,6	142,8/82,4
4VCS-6.2(Y)	2				129				PW Ⓢ	14	8,1	39/68
4VCS-10.2(Y)	1	34,7	4	2,6	139	22 7/8	28 1 1/8	-		21	11,3	59/99
4TCS-8.2(Y)	2				134					17	9,4	49/81
4TCS-12.2(Y)	1	41,3	4	2,6	141	28 1 1/8	35 1 3/8	-		24	13,8	69/113
4PCS-10.2(Y)	2				139					21	11,7	59/99
4PCS-15.2(Y)	1	48,5	4	2,0	147	28 1 1/8	42 1 5/8	-		31	16,3	81/132
4NCS-12.2(Y)	2				141					24	14,1	69/113
4NCS-20.2(Y)	1	56,2	4	2,6	150	28 1 1/8	42 1 5/8	-		37	19,5	97/158
4J-13.2(Y)	2				179					27	15,7	81/132
4J-22.2(Y)	1	63,5	4	4,0	190	28 1 1/8	42 1 5/8	-	380..420YY/3/50	39	21,5	97/158
4H-15.2(Y)	2				183				440..480YY/3/60	31	18,1	81/132
4H-25.2(Y)	1	73,7	4	4,5	203	28 1 1/8	54 2 1/8	-		45	24,9	116/193
4G-20.2(Y)	2				192					37	21,5	97/158
4G-30.2(Y)	1	84,6	4	4,5	206	28 1 1/8	54 2 1/8	-		53	30,1	135/220

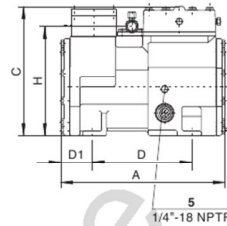
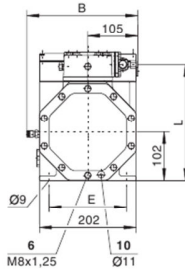
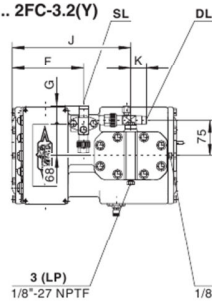


Maßzeichnungen

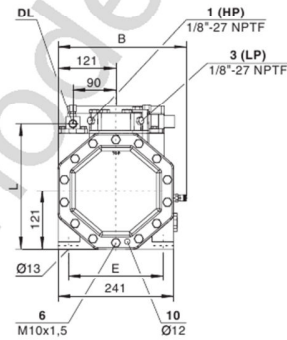
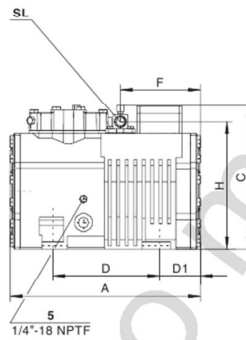
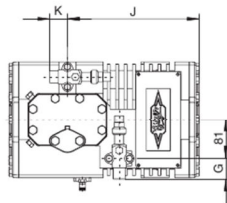
Dimensional drawings

Croquis cotés

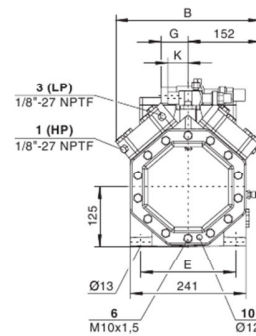
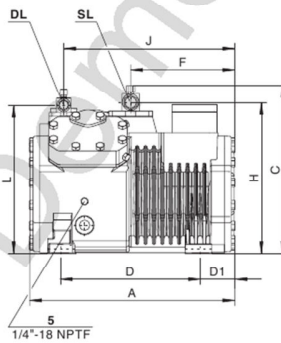
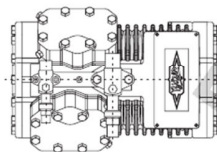
2KC-05.2(Y) .. 2FC-3.2(Y)



2EC-2.2(Y) .. 2CC-4.2(Y)



4FC-3.2(Y) .. 4CC-9.2(Y)



	A	B	C	D	D1	E	F	G	H	J	K	L
mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
2KC-05.2(Y), 2JC-07.2(Y), 2HC-1.2(Y), 2HC-2.2(Y) 2GC-2.2(Y), 2FC-2.2(Y), 2FC-3.2(Y)	344	232	268	208	66	162	149	37	230	248	32	239
2EC-2.2(Y), 2EC-3.2(Y), 2DC-2.2(Y), 2DC-3.2(Y) 2CC-3.2(Y), 2CC-4.2(Y)	398	267	300	223	85	198	167	42	266	275	37	261
4FC-3.2(Y), 4FC-5.2(Y)	432	304	350	293	75	198	221	42	314	361	37	306
4EC-4.2(Y), 4EC-6.2(Y)	432	304	353	293	75	198	221	57	317	361	37	306
4DC-5.2(Y)	432	304	353	293	75	198	221	57	317	361	42	310
4DC-7.2(Y), 4CC-6.2(Y), 4CC-9.2(Y)	458	304	353	293	101	198	247	57	317	387	42	310

Legende für Anschlüsse siehe Seite 31

Legend for connections see page 31

Légende des raccords voir page 31

A.I.2 Trocador de calor tipo placas



CB20 Comfort Unit

Alfa Laval brazed heat exchanger

The CB20 is a heat exchanger with focus on district heating applications such as tap water heating and comfort heating. Design temperature 175 °C. Design pressure 16 bar.

Due to efficient heat transferring, outer dimensions are minimized. This is a very compact unit, which gives flexibility in design work for heating systems.

A standard range, with most of the units on stock, ensures short delivery time. Connection type on the standard range is 4 pcs outer threaded 1" in stainless steel material.

Auxillaries:
High temperature insulation, maximum temperature 140°C.

Couplings:
Welding type in carbon steel and soldering type in brass material.

Quality assurance
Alfa Laval brazed heat exchangers are subject to several laboratory tests to ensure the performance and quality. Both thermal fatigue and pressure fatigue tests are made to achieve problem-free usage and long lifetime.

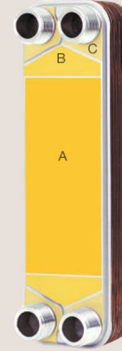


CB20 Comfort unit

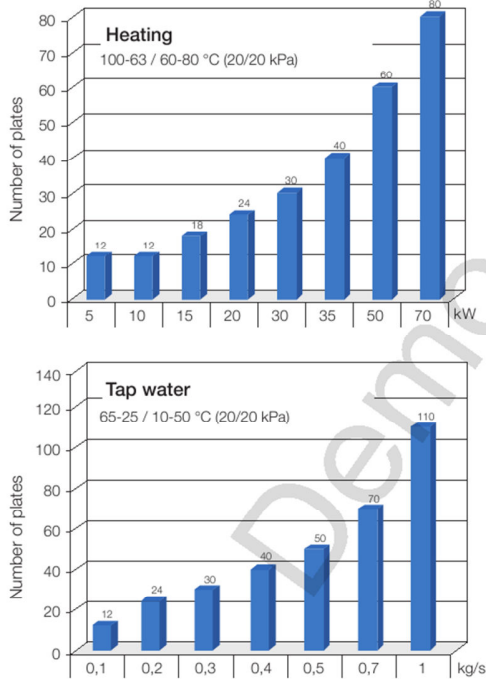
Alfa Laval performance system™

The patented Alfa Laval system is designed to increase performance in compact heat exchangers. Three key features are combined together:

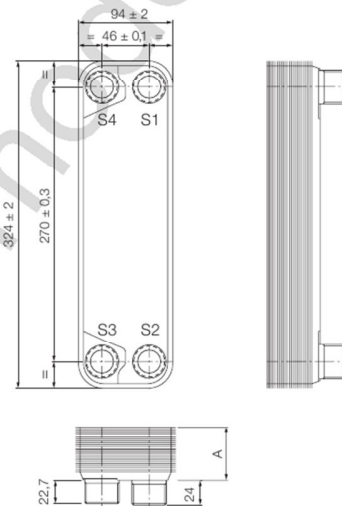
- A) A completely new heat transfer pattern increases the turbulence and thereby the heat transferring. The new pattern also minimizes pressure drop, caused by brazing joints.
- B) A new distribution plate pattern between the port area and the heat transfer area ensures 100% utilization of available heat surface.
- C) A new port hole design minimizes flow velocity in the port region. This gives very low local pressure drop.



CB20 capacity range



Dimensions



Weight (kg) $0,9 + 0,08 \times n$, where n = number of plates
Volume (l/channel) 0,028

PD 68207 E 0202

How to contact Alfa Laval

Contact details for all countries are continually updated on our website. Please visit www.alfalaval.com to access the information directly.

A.I.3 Trocador de calor casco e tubo



Trocadores de Calor

"Casco e Tubos"

Construção

- Casco construído em aço carbono, com tampas removíveis para acesso aos tubos proporcionando fácil limpeza e manutenção. Dimensionados com multi passes garantindo distribuição da água de resfriamento na velocidade necessária para se obter um coeficiente de transmissão de calor ideal;
- Tubos em cobre, fixados nos espelhos (aço carbono) através de processo mecânico de mandrilagem.

Opcionais

- Número de passes do lado do cabeçote variam de 1, 2 ou 4 passes de acordo com a necessidade da aplicação;
- Feixe tubular tipo "F" - Fixo : espelhos fixos quando as temperaturas não ultrapassam 80°C;
- Feixe tubular tipo "R" - Removível : com tubos em "U";
- Feixe tubular tipo "RF" - removível flutuante (espelhos deslizantes) - fornecidos sob consulta.

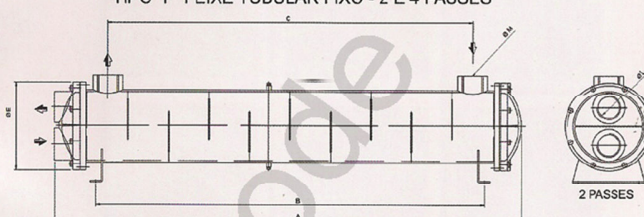
Aplicações

- Resfriamento de óleo em : máquinas injetoras, motores de caixa de engrenagens, redutores, etc;
- Resfriadores: de ar ou gases, de óleo de transformadores, de fluidos para têmperas;
- Aquecedores de água com vapor;
- Condensadores de vapor;
- Resfriamento de água com água;
- Unidades hidráulicas.

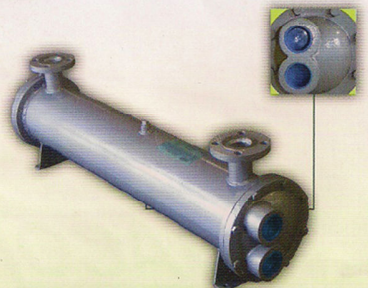
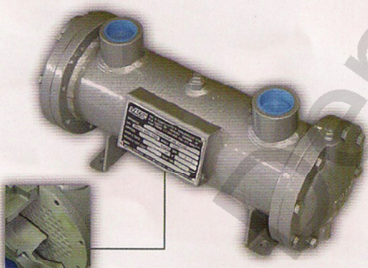
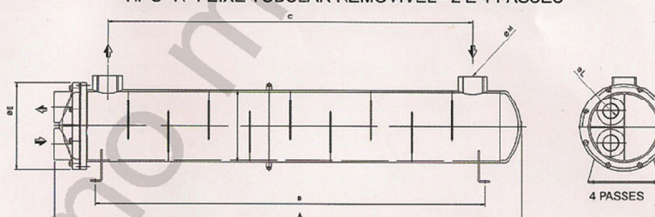
Outras Aplicações

- Motores ou Conversores marítimos: com feixe tubular em cuproníquel, espelhos em latão naval e tampas em bronze industrial com anódos;
- Com fluido refrigerante Amônia (NH₃): construídos totalmente em aço carbono;
- Projetos especiais: construídos em aço inox.

TIPO "F" FEIXE TUBULAR FIXO - 2 E 4 PASSES



TIPO "R" FEIXE TUBULAR REMOVÍVEL - 2 E 4 PASSES



TIPO	SUP. TROCA m²	DIMENSÕES EM MILÍMETROS			ØE	CONEXÕES EM POL. (BSP)			
		A	B	C		2 PASSES		4 PASSES	
						ØL	ØM	ØL	ØM
TSEV - 355 -3-X-Y	0,21	355	230	190	125	3/4"	3/4"	1/2"	3/4"
TSEV - 500 -3-X-Y	0,31	500	375	335					
TSEV - 750 -3-X-Y	0,49	750	525	585					
TSEV - 1000 -3-X-Y	0,67	1000	875	835					
TSEV - 400 -4-X-Y	0,40	355	210	187	160	1"	1"	3/4"	1"
TSEV - 500 -4-X-Y	0,54	500	310	287					
TSEV - 600 -4-X-Y	0,67	750	410	387					
TSEV - 750 -4-X-Y	0,87	1000	560	537					
TSEV - 1000 -4-X-Y	1,20	1000	810	787	190	1 1/2"	1 1/2"	1 1/4"	1 1/2"
TSEV - 500 -5-X-Y	0,87	500	300	265					
TSEV - 600 -5-X-Y	1,08	600	400	365					
TSEV - 750 -5-X-Y	1,41	750	550	515					
TSEV - 1000 -5-X-Y	1,95	1000	800	765	210	2"	2"	1 1/2"	2"
TSEV - 1250 -5-X-Y	2,49	1250	1050	1015					
TSEV - 1500 -5-X-Y	3,02	1500	1300	1265					
TSEV - 1750 -5-X-Y	3,56	1750	1550	1515					
TSEV - 600 -6-X-Y	1,51	600	390	335	270	2"	2"	2"	2"
TSEV - 750 -6-X-Y	1,98	750	540	485					
TSEV - 1000 -6-X-Y	2,76	1000	790	735					
TSEV - 1250 -6-X-Y	3,53	1250	1040	985					
TSEV - 1500 -6-X-Y	4,31	1500	1290	1235	330	3"	3"	2"	3"
TSEV - 1750 -6-X-Y	5,10	1750	1540	1485					
TSEV - 2000 -6-X-Y	5,87	2000	1790	1735					
TSEV - 750 -8-X-Y	3,90	750	490	455					
TSEV - 1000 -8-X-Y	5,48	1000	740	705	330	3"	3"	2"	3"
TSEV - 1250 -8-X-Y	7,00	1250	990	955					
TSEV - 1500 -8-X-Y	8,55	1500	1240	1205					
TSEV - 1750 -8-X-Y	10,24	1750	1490	1455					
TSEV - 2000 -8-X-Y	11,79	2000	1740	1705	330	3"	3"	2"	3"
TSEV - 750 -10-X-Y	5,76	750	490	390					
TSEV - 1000 -10-X-Y	8,24	1000	710	640					
TSEV - 1250 -10-X-Y	10,72	1250	960	890					
TSEV - 1500 -10-X-Y	13,21	1500	1210	1140	330	3"	3"	2"	3"
TSEV - 1750 -10-X-Y	15,70	1750	1460	1390					
TSEV - 2000 -10-X-Y	18,18	2000	1710	1640					

Para mais informações, acesse o site: www.evacon.com.br

A.I.4 Unidade condensadora



Luftgekühlte
Verflüssigungs-
Sätze

mit halbhermetischen
Hubkolbenverdichtern

Air-cooled
Condensing
Units

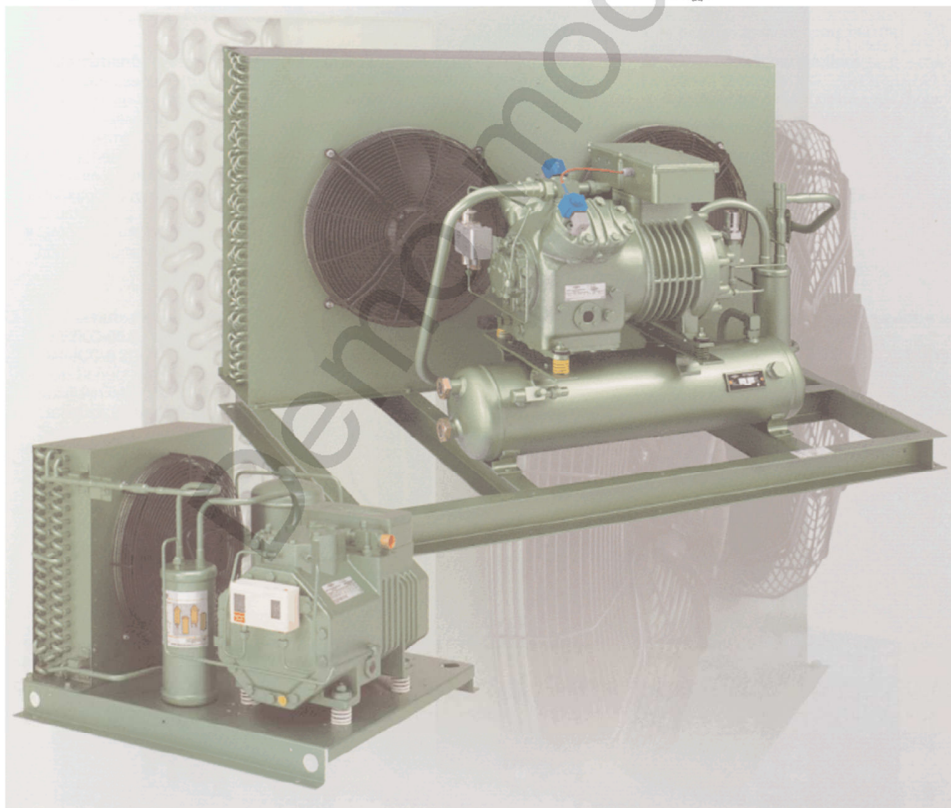
with Semi-hermetic
Reciprocating Compressors

Grupos de
condensación
refrigerados por aire

con compresores a pistón
semi-herméticos



KP-210-1 E



R134a ■ R404A ■ R507A ■ R22

Version 60 Hz

ANEXO I: Informações complementares dos equipamentos do sistema de refrigeração



R22

Standard-Verflüssigungssätze
Leistungswerte, 60 Hz
bezogen auf 20°C Sauggasttemperatur
mit Flüssigkeits-Unterkühlung

Standard units
Performance data, 60 Hz
based on 20°C suction gas temperature
with liquid subcooling

Grupos estándar
Datos de rendimiento, 60 Hz
referidos a una temperatura del gas aspirado
de 20°C con subenfriamiento de líquido

Type	Umgeb.-Temp.	Kälteleistung Cooling capacity Potencia refrigeradora						Leistungsaufnahme Power consumption Consumo de potencia					
Type	Ambient temp.	Q_0 [Watt]						$P_{e①}$ [kW]					
Tipo	Temp. ambiente °C	Verdampfungstemperatur °C						Temperatura de evaporación °C					
	④ ↓	10	5	0	-5	-10	-15	-20	-25	-30	-35		
LH32/2KC-05.2	27	Q	3770	3190	2660	2160	1710	1560	1220	930			
		P	1,40	1,27	1,14	1,02	0,91	0,84	0,71	0,59			
	32	Q	4100	3530	2990	2480	2010	1580	1460	1130	850		
		P	1,63	1,48	1,33	1,20	1,06	0,93	0,88	0,74	0,60		
LH32/2JC-07.2	43	Q		2540	2100	1680	1300	1260	960	710			
		P		1,49	1,32	1,16	1,00	0,97	0,80	0,64			
	27	Q	3760	3200	2670	2190	1950	1540	1180				
		P	1,66	1,48	1,32	1,17	1,11	0,95	0,80				
LH33/2HC-1.2	32	Q		3510	2980	2480	2020	1820	1430	1080			
		P		1,76	1,56	1,38	1,22	1,16	0,99	0,83			
	43	Q			2510	2080	1670		1210	900			
		P			1,75	1,52	1,31		1,06	0,87			
LH33/2HC-1.2E ①	27	Q			4310	3610	2970	2630	2090	1610			
		P			1,86	1,67	1,49	1,36	1,16	0,98			
	32	Q			4030	3370	2770	2460	1940	1480			
		P			1,98	1,78	1,57	1,43	1,21	1,01			
LH33/2HC-2.2	43	Q						2120	1650	1230			
		P						1,56	1,31	1,07			
	27	Q		5860	5060	4320	3620	2980	2400	1880	1420		
		P		2,27	2,05	1,85	1,66	1,48	1,30	1,12	0,93		
LH33/2GC-2.2	32	Q		5480	4740	4040	3380	2770	2230	1730	1300		
		P		2,42	2,19	1,97	1,76	1,56	1,35	1,15	0,94		
	43	Q			3430	2870	2350	1870	1430				
		P			2,23	1,97	1,72	1,47	1,21				
LH33/2GC-2.2E ①	27	Q			5700	4890	4130	3420	3060	2440	1910		
		P			2,46	2,23	2,02	1,82	1,68	1,48	1,29		
	32	Q			5340	4580	3870	3200	2870	2280	1770		
		P			2,60	2,35	2,12	1,89	1,75	1,52	1,32		
LH44/2GC-2.2	43	Q					3310	2740	1960	1480			
		P					2,32	2,05	1,58	1,35			
	27	Q		8400	7300	6270	5320	4440	3650	3230	2570	2000	
		P		2,61	2,41	2,23	2,06	1,89	1,73	1,62	1,45	1,27	
LH44/2GC-2.2E ①	32	Q		7880	6860	5890	4990	4160	3410	3030	2400	1850,00	
		P		2,81	2,59	2,38	2,19	2,00	1,82	1,69	1,50	1,30	
	43	Q			5900	5070	4300	3580	2930	2630	2050	1540	
		P			2,97	2,71	2,46	2,22	1,99	1,83	1,57	1,34	
LH44/2FC-2.2	27	Q			6180	5200	4310	3840	3090	2440			
		P			2,60	2,35	2,11	1,94	1,71	1,48			
	32	Q			5780	4860	4010	3580	2870	2250			
		P			2,75	2,47	2,20	2,02	1,75	1,50			
LH44/2FC-3.2	43	Q						3010	2370	1820			
		P						2,12	1,80	1,53			
	27	Q		8350	7220	6170	5200	4310	3510	2800	2170		
		P		3,22	2,92	2,64	2,39	2,14	1,91	1,68	1,45		
LH44/2EC-2.2	32	Q		7820	6760	5760	4850	4010	3250	2570	1980		
		P		3,44	3,11	2,81	2,52	2,25	1,99	1,73	1,47		
	43	Q			4910	4100	3370	2700	2110				
		P			3,17	2,82	2,47	2,14	1,81				
LH64/2EC-3.2	27	Q			6960	5880	4870	4460	3610	2850			
		P			3,23	2,82	2,46	2,34	2,06	1,78			
	32	Q			6460	5430	4480	4110	3310	2600			
		P			3,37	2,92	2,54	2,44	2,13	1,83			
LH64/2EC-3.2E ①	43	Q							2640	1980			
		P							2,23	1,88			
	27	Q		13430	11510	9770	8210	6800	5560	4460	3500	2670	
		P		3,41	3,20	2,99	2,77	2,54	2,31	2,08	1,86	1,67	
LH53/2DC-2.2	32	Q		12640	10810	9160	7670	6340	5150	4100	3180	2390	
		P		3,72	3,46	3,20	2,93	2,66	2,40	2,15	1,92	1,72	
	43	Q		10910	9280	7800	6470	5270	4210	3260	2430		
		P		4,34	3,96	3,59	3,23	2,89	2,57	2,28	2,04		
LH53/2DC-2.2	27	Q				8410	7090	5870	5160	4160	3280		
		P				3,66	3,25	2,89	2,69	2,36	2,04		
	32	Q				7810	6550	5390	4720	3800	2980		
		P				3,80	3,37	2,98	2,79	2,43	2,10		
LH53/2DC-2.2	43	Q							3680	2940	2270		
		P							3,03	2,56	2,18		

18 Vorläufige Werte

Tentative data

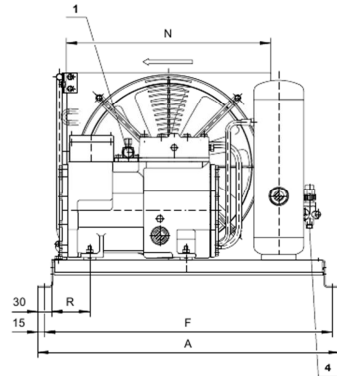
Valores provisionales

KP-210-1



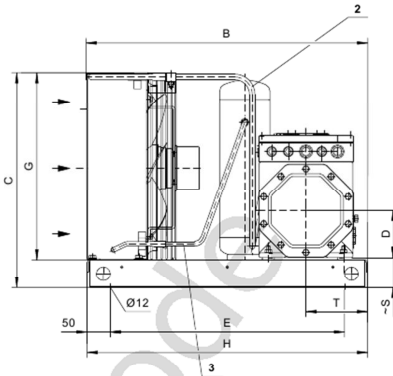
Maßzeichnungen

Verflüssigungssatz
LH32/2KC-05.2(Y) .. LH84/2CC-4.2(Y)



Dimensional drawings

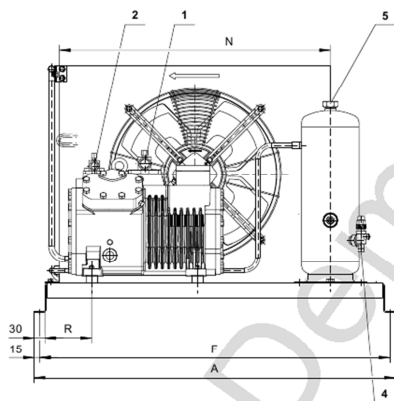
Condensing unit
LH32/2KC-05.2(Y) .. LH84/2CC-4.2(Y)



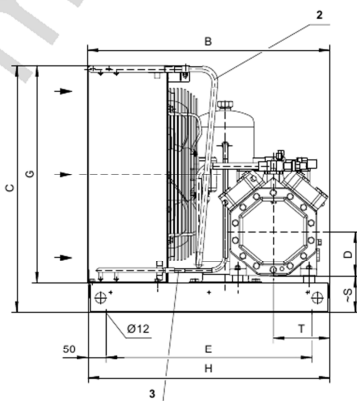
Dibujos acotados

Grupo de condensación
LH32/2KC-05.2(Y) .. LH84/2CC-4.2(Y)

Verflüssigungssatz
LH64/4FC-3.2(Y) .. LH84/4CC-6.2(Y)

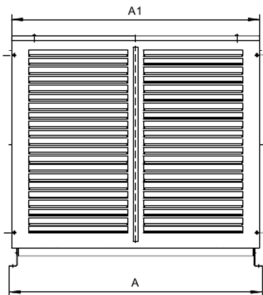


Condensing unit
LH64/4FC-3.2(Y) .. LH84/4CC-6.2(Y)



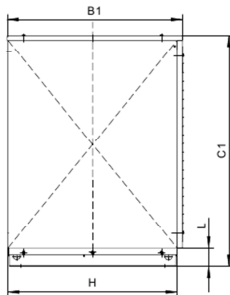
Verflüssigungssatz mit
Wetterschutz-Gehäuse

Housed unit



für / for / para
LH32/2KC-05.2(Y) ..
LH84/4CC-6.2(Y)

Grupo de condensación con carasa de
protección para intemperie



ANEXO I: Informações complementares dos equipamentos do sistema de refrigeração



Abmessungen

Dimensions

Dimensiones

Verflüssigungs- satz Typ Condensing unit type Grupo de condensación Tipo	Abmessungen in mm Dimensions in mm Dimensiones en mm																Anschlüsse / Connections / Conexiones Saugleitung Suction line Tubo de aspiración SLø mm Zoll inch pulgada				Flüssigkeits- leitung Liquid line Tubo de líquido FLø mm Zoll inch pulgada			
	A	A ₁	B	B ₁	C	C ₁	D	E	F	G	H	L	N	R	S	T								
	Standard																Estándar							
LH32/2KC-05.2(Y)	650	630	607	645	466	574	102	505	620	406	605	62	440	82	66	133	12	1/2		10	3/8			
LH32/2JC-07.2(Y)	650	630	607	645	466	574	102	505	620	406	605	62	440	82	66	133	12	1/2		10	3/8			
LH33/2HC-1.2(Y)	650	630	607	645	466	574	102	505	620	406	605	62	440	82	66	133	16	5/8		10	3/8			
LH33/2HC-2.2(Y)	650	630	607	645	466	574	102	505	620	406	605	62	440	82	66	133	16	5/8		10	3/8			
LH33/2GC-2.2(Y)	650	630	607	645	466	574	102	505	620	406	605	62	440	82	66	133	16	5/8		10	3/8			
LH44/2GC-2.2(Y)	650	630	607	645	516	574	102	505	620	456	605	62	490	82	66	133	16	5/8		10	3/8			
LH44/2FC-2.2(Y)	650	630	607	645	516	574	102	505	620	456	605	62	490	82	66	133	16	5/8		10	3/8			
LH44/2FC-3.2(Y)	650	630	607	645	516	574	102	505	620	456	605	62	490	82	66	133	16	5/8		10	3/8			
LH44/2EC-2.2(Y)	650	630	702	740	516	574	121	600	620	456	700	62	490	146	82	174	22	7/8		10	3/8			
LH64/2EC-3.2(Y)	1000	982	672	693	687	915	121	570	970	607	670	72	750	160	102	157	22	7/8		12	1/2			
LH53/2DC-2.2(Y)	1000	982	671	693	536	915	121	570	970	456	670	72	750	160	102	157	22	7/8		10	3/8			
LH64/2DC-3.2(Y)	1000	982	672	693	687	915	121	570	970	607	670	72	750	160	102	157	22	7/8		12	1/2			
LH64/2CC-3.2(Y)	1000	982	672	693	687	915	121	570	970	607	670	72	750	160	102	157	22	7/8		12	1/2			
LH84/2CC-4.2(Y)	1000	982	672	693	837	915	121	570	970	757	670	72	850	160	102	157	22	7/8		12	1/2			
LH64/4FC-3.2(Y)	1000	982	672	693	687	915	125	570	970	607	670	72	750	129	99	157	22	7/8		12	1/2			
LH84/4FC-5.2(Y)	1000	982	672	693	837	915	125	570	970	757	670	72	850	129	99	157	22	7/8		12	1/2			
LH64/4EC-4.2(Y)	1000	982	672	693	687	915	125	570	970	607	670	72	750	129	99	157	28	1 1/8		12	1/2			
LH84/4EC-6.2(Y)	1000	982	672	693	837	915	125	570	970	757	670	72	850	129	99	157	28	1 1/8		12	1/2			
LH84/4DC-5.2(Y)	1000	982	672	693	837	915	125	570	970	757	670	72	850	129	99	157	28	1 1/8		12	1/2			
LH84/4CC-6.2(Y)	1000	982	672	693	837	915	125	570	970	757	670	72	850	129	99	157	28	1 1/8		12	1/2			
hohe Umgebungstemperatur high ambient temperature Temperatura ambiente elevada																								
LH33/2KC-05.2(Y)	650	630	607	645	466	574	102	505	620	406	605	62	440	82	66	133	12	1/2		10	3/8			
LH33/2JC-07.2(Y)	650	630	607	645	466	574	102	505	620	406	605	62	440	82	66	133	12	1/2		10	3/8			
LH44/2HC-1.2(Y)	650	630	607	645	516	574	102	505	620	456	605	62	490	82	66	133	16	5/8		10	3/8			
LH44/2HC-2.2(Y)	650	630	607	645	516	574	102	505	620	456	605	62	490	82	66	133	16	5/8		10	3/8			
LH53/2GC-2.2(Y)	1000	982	671	693	536	915	102	570	970	456	670	72	750	160	102	139	16	5/8		10	3/8			
LH64/2FC-2.2(Y)	1000	982	672	693	687	915	102	570	970	607	670	72	750	160	102	139	16	5/8		12	1/2			
LH64/2EC-2.2(Y)	1000	982	672	693	687	915	121	570	970	607	670	72	750	160	102	157	22	7/8		12	1/2			
LH64/2EC-3.2(Y)	1000	982	672	693	687	915	121	570	970	607	670	72	750	160	102	157	22	7/8		12	1/2			
LH64/2DC-2.2(Y)	1000	982	672	693	687	915	121	570	970	607	670	72	750	160	102	157	22	7/8		12	1/2			
LH64/2DC-3.2(Y)	1000	982	672	693	687	915	121	570	970	607	670	72	750	160	102	157	22	7/8		12	1/2			
LH84/2CC-3.2(Y)	1000	982	672	693	837	915	121	570	970	757	670	72	850	160	102	157	22	7/8		12	1/2			
LH84/2CC-4.2(Y)	1000	982	672	693	837	915	121	570	970	757	670	72	850	160	102	157	22	7/8		12	1/2			
LH84/4FC-3.2(Y)	1000	982	672	693	837	915	125	570	970	757	670	72	850	129	99	157	22	7/8		12	1/2			
LH84/4FC-5.2(Y)	1000	982	672	693	837	915	125	570	970	757	670	72	850	129	99	157	22	7/8		12	1/2			

Anschluss-Positionen

- 1 Saugventil
- 2 Druckleitung
- 3 Kondensat-Leitung
- 4 Kältemittel-Austritt
- 5 Anschluss für Druckentlastungs-Ventil: 1 1/4 UNF

Connection positions

- 1 Suction valve
- 2 Discharge line
- 3 Condensate line
- 4 Refrigerant outlet
- 5 Connection for pressure relief valve: 1 1/4 UNF

Posiciones de conexión

- 1 Válvula de aspiración
- 2 Tubo de gas comprimido
- 3 Tubo de condensado
- 4 Salida de refrigerante
- 5 Conexión para válvula de descarga de presión: 1 1/4 UNF

KP-210-1

27



Maßzeichnungen

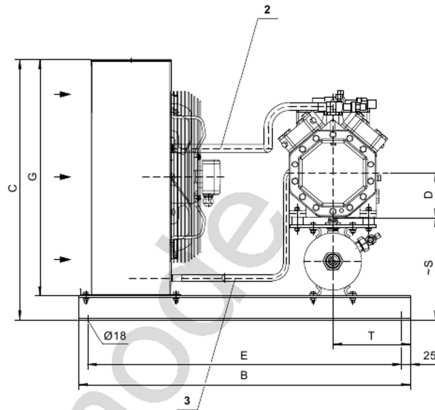
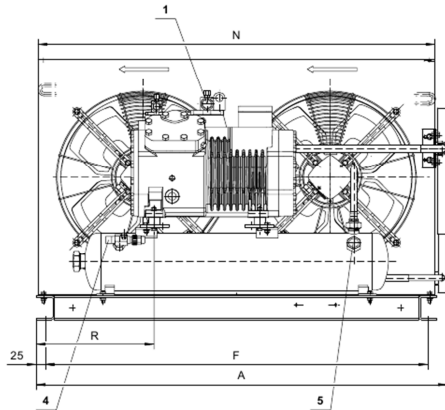
Verflüssigungssatz
LH104/4EC-4.2(Y) .. LH114/4DC-7.2(Y)

Dimensional drawings

Condensing unit
LH104/4EC-4.2(Y) .. LH114/4DC-7.2(Y)

Dibujos acotados

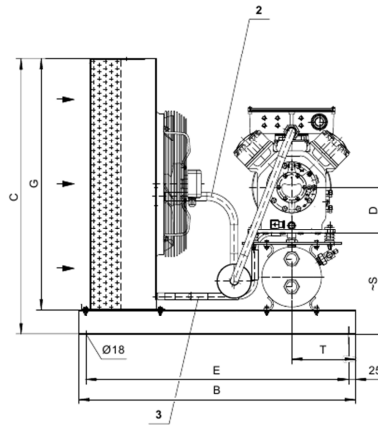
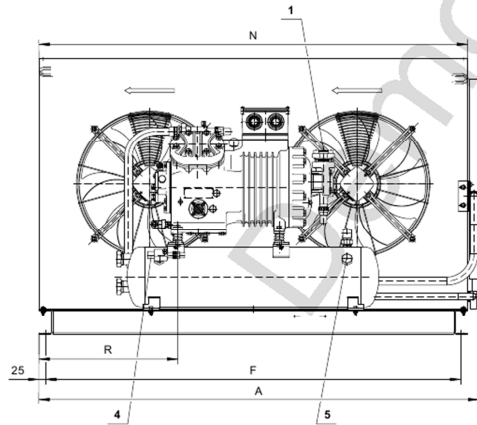
Grupo de condensación
LH104/4EC-4.2(Y) .. LH114/4DC-7.2(Y)



Verflüssigungssatz
LH104/4Z-8.2(Y) .. LH114/6H-25.2(Y)

Condensing unit
LH104/4Z-8.2(Y) .. LH114/6H-25.2(Y)

Grupo de condensación
LH104/4Z-8.2(Y) .. LH114/6H-25.2(Y)



Anschluss-Positionen

- 1 Saugventil
- 2 Druckleitung
- 3 Kondensat-Leitung
- 4 Kältemittel-Austritt
- 5 Anschluss für Druckentlastungs-Ventil: 1 1/4 UNF

Connection positions

- 1 Suction valve
- 2 Discharge line
- 3 Condensate line
- 4 Refrigerant outlet
- 5 Connection for pressure relief valve: 1 1/4 UNF

Posiciones de conexión

- 1 Válvula de aspiración
- 2 Tubo de gas comprimido
- 3 Tubo de condensado
- 4 Salida de refrigerante
- 5 Conexión para válvula de descarga de presión: 1 1/4 UNF

A.I.5 Bomba centrífuga

INFORMAÇÕES ADICIONAIS

DADOS DE OPERAÇÃO:

	BOMBA MODELO	
	KSB HYDROBLOC P 500 / P 1000	KSB HYDROBLOC C 700 / C 1010
VAZÕES	até 45 l/min.	até 290 l/min.
	até 2,7 m³/h	até 17,4 m³/h
ELEVAÇÕES	até 70 m	até 19,5 m
ALTURA MÁXIMA DE SUCÇÃO	7 m	7 m
ALTURA MÁXIMA DE ESCORVA	--	--
MOTOR (Monofásico) - 60 Hz	110 V ou 220 V	110 V / 220 V
(Trifásico) - 60 Hz	220 / 380 V	220 / 380 V
TEMPERATURA MÁXIMA DO LÍQUIDO	80 °C	80 °C
TEMPERATURA MÁXIMA DO AMBIENTE	40 °C	40 °C

DADOS DO MOTOR:

			BOMBA MODELO			
			P 500	P 1000	C 700	C 1010
Grau de Proteção			IP 44	IP 44	IP 44	IP 44
Classe de Isolação			B	B	B	B
MONOFÁSICO	110 V	CORRENTE (A)	5,5	10,4	9,8	11,5
	220 V	CORRENTE (A)	2,8	5,2	4,9	5,7
TRIFÁSICO	220 V	CORRENTE (A)	2,25	3,8	3,3	4,2
	380 V	CORRENTE (A)	1,3	2,2	1,9	2,4

GARANTIA



CARTÃO DE GARANTIA

A KSB Bombas Hidráulicas S. A. garante este produto nas condições expressas no "Termo de Garantia" anexo.

Nome: _____
End.: _____

Cidade: _____ Estado: _____
N. Fiscal: _____ Data: _____

PRODUTO

Modelo: _____
Série: _____

Carimbo e assinatura do revendedor

Cartão do Cliente

CARTÃO DE GARANTIA

A KSB Bombas Hidráulicas S. A. garante este produto nas condições expressas no "Termo de Garantia" anexo.

Nome: _____
End.: _____

Cidade: _____ Estado: _____
N. Fiscal: _____ Data: _____

PRODUTO

Modelo: _____
Série: _____

Carimbo e assinatura do revendedor

Revendedor

CARTÃO DE GARANTIA

A KSB Bombas Hidráulicas S. A. garante este produto nas condições expressas no "Termo de Garantia" anexo.

Nome: _____
End.: _____

Cidade: _____ Estado: _____
N. Fiscal: _____ Data: _____

PRODUTO

Modelo: _____
Série: _____

Carimbo e assinatura do revendedor

Fabricante

A.I. 6 Bomba de deslocamento positivo





RZR 250/RZR 500

O modelos RZR 250/RZR 500 são dois dos mais compactos, e igualmente robustos e silenciosos modelos da família de bombas RZR. Excelente opção para indústria de equipamentos, como componente OEM, nos serviços de transferência, lubrificação, e pressurização de uma ampla variedade de óleos hidráulicos, lubrificantes, óleos de corte (limpos ou contaminados), óleo térmico, e óleos combustíveis desde OC - 1A até AC- 4A.

RZR 250

Conexões		Ø 1/2" BSP
Peso da bomba		5 kg
Peso da motobomba		25 kg
Pressão máxima na saída		30 bar
Temperatura máxima		250 °C
Vazão Nominal	Rotação nominal	Potência do motor *
130 l/h	850 rpm	1/3 CV
160 l/h	1160 rpm	1/2 CV
250 l/h	1750 rpm	1 CV

* Pressão diferencial 15 bar e viscosidade 100 SSU

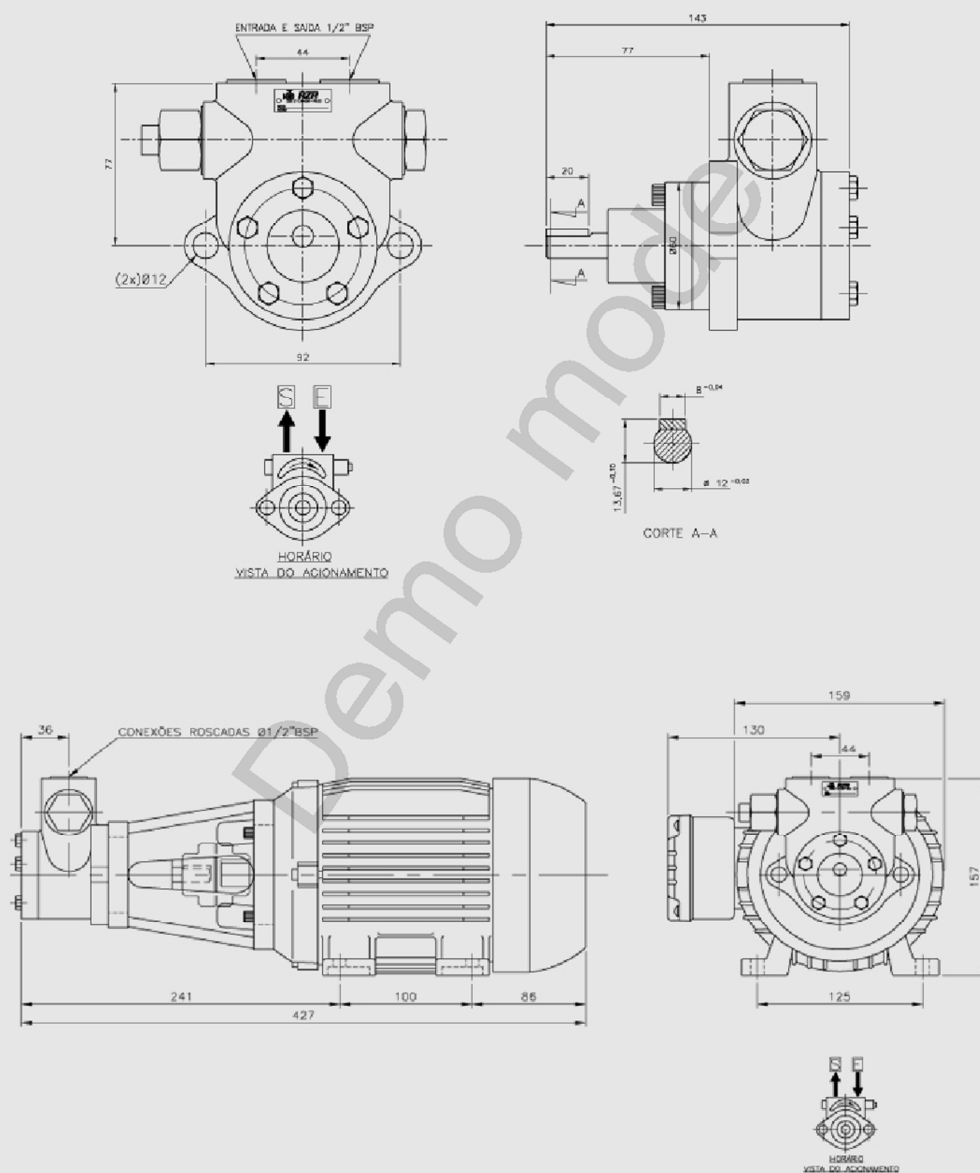
RZR 500

Conexões		Ø 1/2" BSP
Peso da bomba		5 kg
Peso da motobomba		25 kg
Pressão máxima na saída		30 bar
Temperatura máxima		250 °C
Vazão Nominal	Rotação nominal	Potência do motor *
300 l/h	1160 rpm	3/4 CV
500 l/h	1750 rpm	1 CV

* Pressão diferencial 15 bar e viscosidade 100 SSU



RZR 250/RZR 500: bomba e motobomba

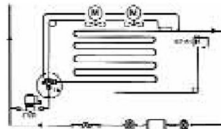


A.I.7 Válvula de expansão



Válvulas de expansão termostática Tipos T, TE e PHT

Introdução



As válvulas de expansão termostática regulam a injeção de líquido refrigerante nos evaporadores. A injeção é controlada em função do superaquecimento do refrigerante. Portanto, as válvulas são especialmente

adequadas para a injeção de líquidos em evaporadores secos, nos quais o superaquecimento na saída do evaporador é proporcional à carga do mesmo.

Características

- **Ampla faixa de temperatura:**
De -60 a +50°C
Podem ser utilizadas em equipamentos com faixa de temperatura normal, baixa e extra baixa, como refrigeração, congelamento e ar condicionado.
- **Conjunto de orifícios intercambiáveis**
- manuseio mais fácil
- facilita a adaptação da capacidade às necessidades da instalação.
- melhor desempenho
- **Capacidades nominais de 0,5 a 1.890 kW**
(0,15 a 540 TR) para R22.
- **Podem ser fornecidas com MOP**
(Máxima Pressão de Operação).
Protege o motor do compressor contra pressões de evaporação excessivas.
- **Bulbo de duplo contato patenteado**
Montagem rápida e simples.
Boa transferência de temperatura do tubo ao bulbo.

Quadro geral de válvulas de expansão para refrigerantes fluorados

Tipo	Capacidade nominal R-22 kW	Faixa de Temperatura de evaporação ¹⁾					Refrigerantes			MOP	Orifício intercambiável	Conexões		
		N	NM	NL	B	A	R-22	R-134a	R-404A R-507			Roscas	Soldar cobre ODF	Filamento
T 2/TE2	0,5 → 15,5	x	x	x	x		x	x	x	x	x	x	x	
TE5	10,5 → 42	x	x	x	x		x	x	x	x	x	x	x	
TE12	15,5 → 63	x	x	x	x		x	x	x	x	x		x	x
TE20	105	x	x	x	x		x	x	x	x	x		x	
TE55	175 → 295	x			x		x	x	x	x	x		x	
PHT	105 → 1890	x			x	x	x	x	x	x				x
TQ	14,5 → 404	x	x	x	x		x	x	x		x	x	x	
PHTQ	145 → 2179	x	x	x	x		x	x	x					x

¹⁾ Faixa N: → -40°C a +10°C
Faixa NM: → -40°C a -5°C
Faixa NL: → -40°C a -15°C
Faixa B: → -60°C a -25°C
Faixa A: → +10°C a +50°C



Válvulas de expansão termostática

Tipos T, TE e PHT

Dados técnicos

Temperatura máxima
 Bulbo, com a válvula montada: 100°C
 Válvula completa não montada: 60°C

Pressão máxima de teste
 T 2, TE 2: $p^* = 36$ bar
 TE 5, TE 12, TE 20, TE 55 e PHT: $p^* = 28$ bar

Temperatura mínima
 - T 2 → TE 55: -60°C
 - PHT: -50°C

Pressão de trabalho admissível
 T 2, TE 2: $P_B = 28$ bar
 TE 5 → TE 55 e PHT: $P_B = 22$ bar

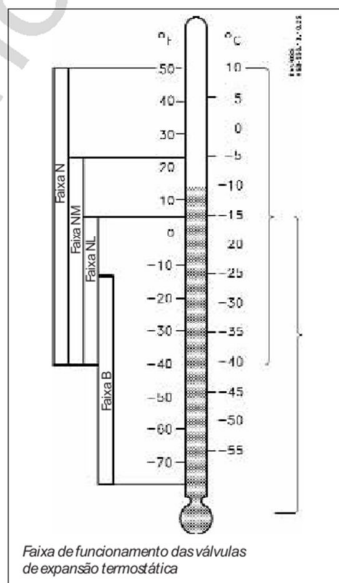
Pontos MOP

Refrigerante	Faixa N -40° → +10°C	Faixa MN -40° → -5°C	Faixa NL -40° → -15°C	Faixa B -60° → -25°C
	Ponto MOP na temperatura de evaporação t_e e pressão de evaporação p_e aprox. +15°C / +60°F	Ponto MOP na temperatura de evaporação t_e e pressão de evaporação p_e aprox. 0°C / +32°F	Ponto MOP na temperatura de evaporação t_e e pressão de evaporação p_e aprox. -10°C / 15°F	Ponto MOP na temperatura de evaporação t_e e pressão de evaporação p_e aprox. -20°C / -4°F
R-22	100 psig	60 psig	35 psig	20 psig
R-134a	55 psig	30 psig	15 psig	
R-404A / R-507 / R-402B	120 psig	75 psig	50 psig	30 psig

MOP = Máxima pressão de operação

O valor MOP é a pressão de evaporação na qual a válvula de expansão irá restringir a injeção de líquido no evaporador, impedindo assim que a temperatura de evaporação aumente e consequentemente que a pressão de sucção aumente. Após alcançar o ponto MOP, o aumento da temperatura do bulbo não causará a abertura da válvula de expansão.

Se o ajuste de superaquecimento da válvula de expansão efetuado em fábrica for alterado, o ponto MOP mudará. Aumentando o ajuste do superaquecimento, o ponto MOP é reduzido e vice-versa.



Dimensionamento

O dimensionamento das válvulas de expansão dependem do seguinte:

- carga máxima do evaporador
- temperatura de evaporação
- temperatura de condensação
- subresfriamento do líquido

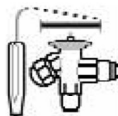
A perda de carga através da válvula de expansão é a diferença entre as pressões de condensação e evaporação do compressor, menos a perda de carga na tubulação da linha de líquido e perda de carga nos acessórios da linha de líquido. (Ex.: filtro secador, registro, válvula solenóide, etc...)



Válvulas de expansão termostática com conexões rosca, tipos T 2 e TE 2 Válvulas Completas

Especificações

Válvulas completas T 2 e TE 2
com conexões rosca



Faixa N (sem MQ): -40 a +10°C **R-22, R-134a, R-404A/R-507/R-402B**

Refrigerante	Tipo de válvula	Capacidade nominal (kW ¹⁾)	Número do orifício	Equalização de pressão	Conexões em polegada		Nº de Código
					Entrada	Saída	
R-22	TX 2-0.15	0.5	0X	Int	3/8	1/2	068Z320609
	TX 2-0.3	1.0	00	Int	3/8	1/2	068Z320610
	TX 2-0.7	2.5	01	Int	3/8	1/2	068Z320601
	TX 2-1.0	3.5	02	Int	3/8	1/2	068Z320602
	TX 2-1.5	5.2	03	Int	3/8	1/2	068Z320603
	TX 2-2.3	8.0	04	Int	3/8	1/2	068Z320604
	TX 2-3.0	10.5	05	Int	3/8	1/2	068Z320605
	TX 2-4.5	15.5	06	Int	3/8	1/2	068Z320606
	TEX 2-0.15	0.5	0X	Ext	3/8	1/2	068Z320909
	TEX 2-0.3	1.0	00	Ext	3/8	1/2	068Z320910
	TEX 2-0.7	2.5	01	Ext	3/8	1/2	068Z320901
	TEX 2-1.0	3.5	02	Ext	3/8	1/2	068Z320902
	TEX 2-1.5	5.2	03	Ext	3/8	1/2	068Z320903
	TEX 2-2.3	8.0	04	Ext	3/8	1/2	068Z320904
R-134a	TN 2-0.25	0.9	00	Int	3/8	1/2	068Z334610
	TN 2-0.5	1.8	01	Int	3/8	1/2	068Z334601
	TN 2-0.8	2.6	02	Int	3/8	1/2	068Z334602
	TN 2-1.3	4.6	03	Int	3/8	1/2	068Z334603
	TN 2-1.9	6.7	04	Int	3/8	1/2	068Z334604
	TN 2-2.5	8.6	05	Int	3/8	1/2	068Z334605
	TN 2-3.0	10.5	06	Int	3/8	1/2	068Z334606
	TBN 2-0.25	0.9	00	Ext	3/8	1/2	068Z334810
	TBN 2-0.5	1.8	01	Ext	3/8	1/2	068Z334801
	TBN 2-0.8	2.6	02	Ext	3/8	1/2	068Z334802
	TBN 2-1.3	4.6	03	Ext	3/8	1/2	068Z334803
	TBN 2-1.9	6.7	04	Ext	3/8	1/2	068Z334804
	TBN 2-2.5	8.6	05	Ext	3/8	1/2	068Z334805
	TBN 2-3.0	10.5	06	Ext	3/8	1/2	068Z334806
R-404A/ R-507/ R-402B	TS 2-0.21	0.7	00	Int	3/8	1/2	068Z340010
	TS 2-0.45	1.6	01	Int	3/8	1/2	068Z340001
	TS 2-0.6	2.1	02	Int	3/8	1/2	068Z340002
	TS 2-1.2	4.2	03	Int	3/8	1/2	068Z340003
	TS 2-1.7	6.0	04	Int	3/8	1/2	068Z340004
	TS 2-2.2	7.7	05	Int	3/8	1/2	068Z340005
	TS 2-2.6	9.1	06	Int	3/8	1/2	068Z340006
	TES 2-0.21	0.7	00	Ext	3/8	1/2	068Z340310
	TES 2-0.45	1.6	01	Ext	3/8	1/2	068Z340301
	TES 2-0.6	2.1	02	Ext	3/8	1/2	068Z340302
	TES 2-1.2	4.2	03	Ext	3/8	1/2	068Z340303
	TES 2-1.7	6.0	04	Ext	3/8	1/2	068Z340304
	TES 2-2.2	7.7	05	Ext	3/8	1/2	068Z340305
	TES 2-2.6	9.1	06	Ext	3/8	1/2	068Z340306

- ¹⁾ A capacidade nominal está baseada:
- Na temperatura de evaporação
t_e = +5°C
- Na temperatura de condensação
t_c = +32°C
- Na temperatura do refrigerante antes
da válvula t₁ = +28°C

Interpretação da Nomenclatura

Exemplo: TEN 2-0.5

T = Válvula de expansão termostática

E = Equalização de pressão externa 1/4" / 6 mm

N = Refrigerante R-134a,

(X= R-22)

(9= R-404A)

2- = Tamanho da válvula

0.5 = Capacidade nominal em TR

Tabelas de capacidades

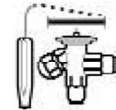
Ver as tabelas de capacidades detalhadas.



Válvulas de expansão termostática

Tipos T 2 e TE 2

Especificações, componentes com conexões rosca x rosca



Elemento termostático com braçadeira de sensor sem orifício, filtro e porcas.

Refrigerante	Tipo de Válvula	Equalização de pressão	Tubo capilar m	Conexão		Nº de código					
				Entrada x Saída		Faixa N -40 a +10°C		Faixa NM -40 a -5°C	Faixa NL -40 a -15°C	Faixa B -60 a -25°C	
				pol. x pol.	mm x mm	Sem MOP	Com MOP	Com MOP	Com MOP	Sem MOP	Com MOP
R-22	TX2	Int.	1.5	3/8 x 1/2	10 x 12	068Z3206	068Z3208	068Z3224	068Z3226	068Z3207	068Z3228
	TEX 2	Ext.	1.5	3/8 x 1/2	10 x 12	068Z3209	068Z3211	068Z3225	068Z3227	068Z3210	068Z3229
R-134a	TN 2	Int.	1.5	3/8 x 1/2	10 x 12	068Z3346	068Z3347	068Z3393	068Z3369		
	TEN 2	Ext.	1.5	3/8 x 1/2	10 x 12	068Z3348	068Z3349	068Z3392	068Z3370		
R-404A/	TS2	Int.	1.5	3/8 x 1/2	10 x 12	068Z3400	068Z3402	068Z3406	068Z3408	068Z3401	068Z3410
R-507/R-402B	TES2	Ext.	1.5	3/8 x 1/2	10 x 12	068Z3403	068Z3405	068Z3407	068Z3409	068Z3404	068Z3411

Obs.: Nas válvulas com conexões em polegadas, a conexão para equalização de pressão é 1/4".

Conjunto de orifício com filtro

A capacidade nominal está baseada:

Na temperatura da evaporação

$t_e = +5^\circ\text{C}$ na faixa N e $t_e = -30^\circ\text{C}$ para a faixa B.

Na temperatura de condensação

$t_c = +32^\circ\text{C}$

Na temperatura do refrigerante antes da válvula

$t_1 = +28^\circ\text{C}$

Faixa N: -40 a +10°C

Número de orifício	Capacidade nominal em toneladas (TR)			Capacidade nominal em kW			Nº de código
	R-22	R-134a	R-404A/ R-507/ R-402B	R-22	R-134a	R-404A/ R-507	
0X	0.15	0.11	0.11	0.5	0.4	0.38	068-2002
00	0.3	0.25	0.21	1.0	0.9	0.7	068-2003
01	0.7	0.5	0.45	2.5	1.8	1.6	068-2010
02	1.0	0.8	0.6	3.5	2.6	2.1	068-2015
03	1.5	1.3	1.2	5.2	4.6	4.2	068-2006
04	2.3	1.9	1.7	8.0	6.7	6.0	068-2007
05	3.0	2.5	2.2	10.5	8.6	7.7	068-2008
06	4.5	3.0	2.6	15.5	10.5	9.1	068-2009

Faixa B: -60 a -25°C

0X	0.15		0.11	0.5		0.38	068-2002
00	0.2		0.21	0.7		0.7	068-2003
01	0.3		0.45	1.0		1.6	068-2010
02	0.6		0.6	2.1		2.1	068-2015
03	0.8		1.0	2.8		3.5	068-2006
04	1.2		1.4	4.2		4.9	068-2007
05	1.5		1.7	5.2		6.0	068-2008
06	2.0		1.9	7.0		6.6	068-2009

Exemplo:

Uma válvula de expansão termostática consiste

de dois elementos + porcas, se necessário:

- 1 elemento termostático
- 1 conjunto de orifícios e porcas flangeadas

Ao especificar-se uma válvula de expansão

termostática TEX 2 com orifício 01, cinco

números de códigos são necessários:

- 1 elemento termostático, **068Z3209**
- 1 conjunto de orifício 01, **068-2010**



Válvulas de expansão termostática Tipos T 2 e TE 2



Especificações, componentes com conexões rosca x solda

Elemento termostático com braçadeira de sensor sem orifício, filtro e porcas

Refrigerante	Tipo de Válvula	Equalização de pressão	Tubo capilar	Conexão				Nº de código				
				Entradas rosca		Saída solda a cobre ODF		Faixa N -40 a +10°C		Faixa NL -40 a -15°C	Faixa B -60 a -25°C	
				m	pol.	pol.	mm	Sem MOP	Com MOP	Com MOP	Sem MOP	Com MOP
R-22	TX 2	Int.	1.5	3/8	1/2		12	068Z3281	068Z3287		068Z3357	068Z3319
	TX 2	Int.	1.5	3/8				068Z3302	068Z3308	068Z3366	068Z3361	068Z3276
	TEX 2	Ext.	1.5	3/8	1/2		12	068Z3284	068Z3290		068Z3359	068Z3320
	TEX 2	Ext.	1.5	3/8				068Z3305	068Z3311	068Z3367	068Z3363	068Z3277
R-134a	TN 2	Int.	1.5	3/8	1/2		12	068Z3383	068Z3387			
	TN 2	Int.	1.5	3/8				068Z3384	068Z3388			
	TEN 2	Ext.	1.5	3/8	1/2		12	068Z3385	068Z3389			
	TEN 2	Ext.	1.5	3/8				068Z3386	068Z3390			
R-404A/ R-507/ R-402B	TS 2	Int.	1.5	3/8	1/2		12	068Z3414	068Z3416	068Z3429	068Z3418	068Z3420
	TS 2	Int.	1.5	3/8				068Z3435	068Z3423	068Z3436	068Z3425	068Z3427
	TES 2	Ext.	1.5	3/8	1/2		12	068Z3415	068Z3417	068Z3430	068Z3419	068Z3421
	TES 2	Ext.	1.5	3/8				068Z3422	068Z3424	068Z3437	068Z3426	068Z3428

¹⁾ Nas válvulas com conexões em polegadas, a conexão para a equalização de pressão é de 1/4". As válvulas com conexões em mm têm conexão de equalização de pressão de 6 mm.

Adaptador para solda



O adaptador é utilizado nas válvulas de expansão termostática T 2 e TE 2 com conexões alargada x soldada de cobre. Se o adaptador é montado corretamente, cumpre os requisitos de fechamento da norma DIN 8964.

O adaptador tem as seguintes vantagens:

- Permite trocar o conjunto de orifício.
- Permite trocar ou limpar o filtro.

Adaptador para solda de cobre sem conjunto de orifício nem filtro

Conexão soldada de cobre ODF	Nº de código
1/4 polegadas	068-2062
6 mm	068-2063
3/8 polegadas	068-2060
10 mm	068-2061

Filtro para adaptador para solda de cobre

Descrição	Nº de código
Filtro sem o conjunto de orifício	068-0015

O orifício padrão das válvulas T 2 e TE 2 pode ser utilizado com o adaptador soldado de cobre quando o filtro da válvula de expansão for trocado por outro filtro especificado em separado.

Somente assim serão cumpridos os requisitos de fechamento da norma DIN 8964.

Também há um adaptador soldado de cobre para filtros secadores.

Conjunto de orifício com filtro para adaptador soldado de cobre

Numero do orifício	Nº de código
0X	068-2089
00	068-2090
01	068-2091
02	068-2092
03	068-2093
04	068-2094
05	068-2095
06	068-2096



Tabelas de capacidade para válvulas de expansão termostática

Tipos T, TE e PHT

R-22

Capacidade em kW para a faixa NT -40 a +10°C

Tipo de válvula	Nº do orifício	Queda de pressão através da válvula Δp bar								Queda de pressão através da válvula Δp bar							
		2	4	6	8	10	12	14	16	2	4	6	8	10	12	14	16

Temperatura de evaporação +10°C										Temperatura de evaporação 0°C									
TX2/TEX 2-0.15	0X	0.37	0.48	0.55	0.60	0.63	0.65	0.67		0.37	0.48	0.55	0.59	0.63	0.65	0.66	0.66		
TX2/TEX 2-0.3	00	0.87	1.1	1.2	1.3	1.4	1.4	1.5	0.84	1.0	1.2	1.3	1.3	1.4	1.4	1.4	1.4		
TX2/TEX 2-0.7	01	2.2	2.8	3.2	3.4	3.6	3.7	3.8	1.9	2.4	2.7	3.0	3.1	3.2	3.3	3.3	3.3		
TX2/TEX 2-1.0	02	3.0	4.0	4.7	5.1	5.4	5.6	5.8	2.6	3.4	4.0	4.3	4.6	4.8	4.9	5.0	5.0		
TX2/TEX 2-1.5	03	5.4	7.2	8.3	9.1	9.7	10.0	10.2	4.6	6.1	7.1	7.8	8.2	8.5	8.7	8.8	8.8		
TX2/TEX 2-2.3	04	8.1	10.8	12.5	13.8	14.5	15.0	15.4	6.9	9.1	10.5	11.5	12.2	12.7	13.0	13.2	13.2		
TX2/TEX 2-3.0	05	10.2	13.6	15.7	17.2	18.3	18.9	19.3	8.8	11.6	13.3	14.6	15.5	16.1	16.4	16.6	16.6		
TX2/TEX 2-4.5	06	12.6	16.7	19.3	21.0	22.3	23.1	23.5	10.8	14.2	16.3	17.8	18.9	19.6	20.0	20.2	20.2		
TEX 5-3	01	12.4	16.3	18.8	20.5	21.7	22.4	22.8	12.8	16.7	19.1	20.8	22.0	22.7	23.2	23.3	23.3		
TEX 5-4.5	02	17.2	22.5	25.9	28.1	29.7	30.6	31.1	17.7	22.9	26.1	28.3	29.9	30.9	31.5	31.7	31.7		
TEX 5-7.5	03	25.3	32.8	37.4	40.6	42.6	43.9	44.7	25.9	33.0	37.5	40.6	42.8	44.2	45.0	45.3	45.3		
TEX 5-12	04	35.8	46.6	53.3	57.8	60.8	62.6	63.9	36.6	47.0	53.5	58.0	61.2	63.2	64.3	64.7	64.7		
TEX 12-4.5	01	16.8	22.5	26.1	28.6	30.3	31.4	32.1	16.1	21.2	24.5	26.8	28.5	29.6	30.3	30.6	30.6		
TEX 12-7.5	02	27.3	36.4	42.1	46.1	48.8	50.7	51.6	26.2	34.5	39.8	43.5	46.1	47.8	48.9	49.3	49.3		
TEX 12-12	03	40.2	53.3	61.6	67.2	71.1	73.5	74.9	38.7	50.8	58.5	63.9	67.7	70.3	71.9	72.6	72.6		
TEX 12-18	04	53.2	70.2	80.9	88.1	93.0	96.1	97.8	51.7	67.6	77.8	85.0	90.2	93.7	95.8	96.9	96.9		
TEX 20-30	01	72.0	94.4	108	118	124	129	131	66.3	86.0	98.5	107	113	118	120	121	121		
TEX 55-50	01	158	209	241	263	278	287	293	145	190	218	237	251	260	265	267	267		
TEX 55-85	02	239	313	360	391	412	425	432	221	286	326	355	375	388	395	397	397		
PHTX 85	1	67.3	95.0	112	124	133	139	142	56.7	76.6	93.4	103	111	115	119	121	121		
PHTX 85	2	109	151	178	196	209	217	222	94.4	131	153	169	180	188	194	196	196		
PHTX 85	3	174	244	287	316	336	349	356	147	206	241	265	283	295	303	306	306		
PHTX 85	4	299	422	493	542	572	594	606	230	331	391	432	460	480	495	500	500		
PHTX 125	1	518	605	695	803	876	927	957	454	573	698	763	813	840	863	870	870		
PHTX 300	1	786	1048	1211	1317	1387	1432	1455	671	887	1022	1110	1162	1216	1250	1271	1271		
PHTX 300	2	1290	1688	1935	2096	2202	2269	2302	1133	1471	1685	1827	1941	1997	2048	2077	2077		

Temperatura de evaporação -10°C										Temperatura de evaporação -20°C									
TX2/TEX 2-0.15	0X	0.37	0.47	0.53	0.57	0.60	0.63	0.64	0.64	0.44	0.50	0.54	0.57	0.59	0.61	0.61			
TX2/TEX 2-0.3	00	0.79	0.96	1.1	1.2	1.2	1.3	1.3	1.3	0.88	1.0	1.1	1.1	1.2	1.2	1.2			
TX2/TEX 2-0.7	01	1.6	2.0	2.3	2.5	2.6	2.7	2.8	2.8	1.7	1.9	2.0	2.2	2.3	2.3	2.3			
TX2/TEX 2-1.0	02	2.2	2.9	3.3	3.6	3.8	4.0	4.1	4.1	2.4	2.7	2.9	3.1	3.2	3.3	3.3			
TX2/TEX 2-1.5	03	3.9	5.1	5.9	6.4	6.8	7.1	7.3	7.3	4.2	4.8	5.2	5.5	5.8	5.9	6.0			
TX2/TEX 2-2.3	04	5.8	7.6	8.7	9.5	10.1	10.5	10.8	10.9	6.2	7.1	7.7	8.2	8.5	8.7	8.8			
TX2/TEX 2-3.0	05	7.4	9.6	11.0	12.0	12.8	13.3	13.6	13.8	7.9	9.0	9.8	10.3	10.8	11.0	11.2			
TX2/TEX 2-4.5	06	9.1	11.8	13.5	14.7	15.6	16.2	16.6	16.8	9.6	11.0	11.9	12.6	13.1	13.5	13.7			
TEX 5-3	01	11.1	14.3	16.3	17.7	18.8	19.5	19.9	20.1	11.5	13.0	14.1	15.0	15.6	16.0	16.2			
TEX 5-4.5	02	15.4	19.7	22.4	24.3	25.7	26.7	27.3	27.6	15.9	18.1	19.6	20.8	21.6	22.1	22.4			
TEX 5-7.5	03	22.7	28.7	32.7	35.6	37.8	39.4	40.4	40.9	23.2	26.3	28.7	30.6	32.0	32.9	33.5			
TEX 5-12	04	32.3	41.1	46.8	51.0	54.1	56.3	57.7	58.4	33.2	37.7	41.1	43.7	45.7	47.0	47.8			
TEX 12-4.5	01	18.7	21.4	23.4	24.8	25.8	26.4	26.6	26.6	15.9	18.1	19.6	20.8	21.6	22.1	22.4			
TEX 12-7.5	02	30.4	34.8	37.9	40.2	41.8	42.8	43.2	43.2	25.9	29.4	32.0	33.9	35.2	36.1	36.5			
TEX 12-12	03	44.5	50.9	55.6	59.0	61.4	62.9	63.7	63.7	37.7	42.9	46.7	49.6	51.7	53.1	53.9			
TEX 12-18	04	59.1	67.7	74.0	78.7	82.1	84.3	85.6	85.6	49.9	57.0	62.3	66.4	69.6	71.8	73.1			
TEX 20-30	01	75.4	85.9	93.6	99.2	103	106	107	107	63.7	72.4	78.8	83.8	87.4	90.0	91.4			
TEX 55-50	01	166	189	205	217	225	229	231	231	140	158	171	181	187	191	193			
TEX 55-85	02	251	285	309	327	339	346	349	349	213	240	260	275	285	291	294			
PHTX 85	1	46.0	64.0	74.9	82.9	88.4	92.9	94.5	97.4	49.6	57.8	63.3	68.2	71.5	73.1	75.3			
PHTX 85	2	78.4	108	126	139	148	156	159	163	85.6	99.5	109	117	123	125	129			
PHTX 85	3	119	166	195	215	228	239	245	248	129	151	166	178	186	192	195			
PHTX 85	4	153	231	276	310	334	350	361	368	139	165	187	205	215	230	234			
PHTX 125	1	381	505	582	637	677	707	727	730	403	465	511	541	567	585	591			
PHTX 300	1	552	723	827	898	957	1002	1034	1040	570	648	711	751	789	821	818			
PHTX 300	2	953	1228	1401	1522	1620	1695	1747	1757	990	1124	1233	1304	1370	1425	1422			

Correção devido à variação do subresfriamento Δt_{sub}

Nota: Um subresfriamento insuficiente pode produzir evaporação instantânea (flash gas), o que poderá causar danos aos controles

As capacidades de evaporação terão que ser corrigidas se o subresfriamento for diferente de 4K. A capacidade corrigida pode ser obtida dividindo-se a

capacidade necessária de evaporação pelo fator de correção a seguir. Poderá, então, ser feita a seleção com as tabelas anteriores.

Δt_{sub}	4 K	10 K	15 K	20 K	25 K	30 K	35 K	40 K	45 K	50 K
Fator de correção	1.00	1.06	1.11	1.15	1.20	1.25	1.30	1.35	1.39	1.44

Exemplo
Refrigerante = R22
Capacidade de evaporação $Q_0 = 5$ kW

Subresfriamento = 10 K
Fator de correção segundo a tabela = 1,07
Capacidade corrigida = $5 \div 1,07 = 4,67$ kW

1 kW = 860 Kcal/h

9

ANEXO I: Informações complementares dos equipamentos do sistema de refrigeração



Tabelas de capacidade para válvulas de expansão termostática Tipos T, TE e PHT

Capacidade em kW para a faixa Nt: -40 a +10°C

R-22

Tipo de válvula	Nº do orifício	Queda de pressão através da válvula Δp bar								Queda de pressão através da válvula Δp bar							
		2	4	6	8	10	12	14	16	2	4	6	8	10	12	14	16

Temperatura de evaporação -30°C										Temperatura de evaporação -40°C									
TX2/TEX 2-0.15	0X		0.40	0.45	0.49	0.52	0.55	0.56	0.57		0.42	0.45	0.48	0.50	0.52	0.53			
TX2/TEX 2-0.3	00		0.79	0.90	0.96	1.0	1.1	1.1	1.1		0.80	0.86	0.92	0.95	0.98	0.99			
TX2/TEX 2-0.7	01		1.4	1.5	1.7	1.8	1.8	1.9	1.9		1.3	1.4	1.4	1.5	1.5	1.6			
TX2/TEX 2-1.0	02		1.9	2.2	2.7	2.5	2.6	2.6	2.7		1.7	1.9	2.0	2.0	2.1	2.1			
TX2/TEX 2-1.5	03		3.4	3.9	4.2	4.4	4.6	4.7	4.8		3.1	3.4	3.5	3.7	3.8	3.8			
TX2/TEX 2-2.3	04		5.0	5.7	6.2	6.5	6.8	7.0	7.1		4.6	4.9	5.2	5.4	5.6	5.7			
TX2/TEX 2-3.0	05		6.4	7.2	7.8	8.3	8.6	8.8	9.0		5.8	6.3	6.6	6.9	7.1	7.2			
TX2/TEX 2-4.5	06		7.8	8.8	9.6	10.1	10.5	10.8	11.0		7.1	7.7	8.1	8.4	8.7	8.8			
TEX 5-3	01		9.0	10.2	11.1	11.7	12.2	12.5	12.7		7.9	8.5	9.0	9.4	9.7	9.8			
TEX 5-4.5	02		12.6	14.3	15.4	16.4	17.0	17.5	17.8		11.1	12.0	12.7	13.3	13.7	13.9			
TEX 5-7.5	03		18.3	20.8	22.7	24.2	25.4	26.2	26.8		16.2	17.7	19.0	19.9	20.7	21.2			
TEX 5-12	04		26.3	29.8	32.5	34.6	36.3	37.5	38.2		23.2	25.3	27.1	28.5	29.5	30.2			
TEX 12-4.5	01		14.8	16.0	16.9	17.6	18.0	18.3		11.9	12.8	13.5	14.0	14.4	14.6				
TEX 12-7.5	02		24.2	26.2	27.7	28.8	29.5	29.9		19.4	21.0	22.2	23.1	23.7	24.1				
TEX 12-12	03		35.1	38.1	40.5	42.4	43.7	44.5		28.1	30.6	32.6	34.1	35.3	36.1				
TEX 12-18	04		46.6	51.0	54.6	57.4	59.6	61.0		37.4	41.1	44.2	46.8	48.8	50.3				
TEX 20-30	01		59.2	64.5	68.8	72.0	74.4	75.8		47.5	51.8	55.4	58.2	60.4	61.9				
TEX 55-50	01		129	139	146	151	155	156		102	110	116	120	122	123				
TEX 55-85	02		197	212	224	232	237	240		158	170	178	185	189	191				
PHTX 85	1		36.6	42.0	46.8	49.0	52.2	54.3	55.9		30.6	33.6	36.1	38.0	39.4	40.2			
PHTX 85	2		64.1	74.7	81.7	86.9	91.1	94.6	97.4		54.0	59.2	63.7	66.9	69.4	70.4			
PHTX 85	3		95.3	112	124	132	138	144	147		79.9	88.5	94.7	99.7	104	107			
PHTX 85	4		100	120	134	145	153	158	161		84.7	95.5	103	111	119	119			
PHTX 125	1		310	358	390	413	434	449	461		266	289	309	321	339	340			
PHTX 300	1		429	487	536	570	598	621	627		364	399	430	454	467	474			
PHTX 300	2		759	862	949	1011	1062	1104	1115		655	719	775	820	844	857			

Correção devido à variação do subresfriamento Δt_{sub}

Nota: Um subresfriamento insuficiente pode produzir evaporação instantânea (flash gas), o que poderá causar danos aos controles.

As capacidades de evaporação terão que ser corrigidas se o subresfriamento for diferente de 4K. A capacidade corrigida pode ser obtida dividindo-se a

capacidade necessária de evaporação pelo fator de correção a seguir. Poderá, então, ser feita a seleção com as tabelas anteriores.

Δt_{sub}	4 K	10 K	15 K	20 K	25 K	30 K	35 K	40 K	45 K	50 K
Fator de correção	1.00	1.06	1.11	1.15	1.20	1.25	1.30	1.35	1.39	1.44

Exemplo
Refrigerante = R-22
Capacidade de evaporação $Q_0 = 5$ kW

Subresfriamento = 10 K
Fator de correção segundo a tabela = 1,06
Capacidade corrigida = $5 \times 1,06 = 4,72$ kW



Tabelas de capacidade para válvulas de expansão termostática

Tipos T, TE e PHT

Capacidade em kW para a faixa B-60 a +10°C

R-22

Tipo de válvula	Nº do orifício	Queda de pressão através da válvula Δp bar								Queda de pressão através da válvula Δp bar							
		2	4	6	8	10	12	14	16	2	4	6	8	10	12	14	16
Temperatura de evaporação -25°C										Temperatura de evaporação -30°C							
TX2/TEX 2-0.2	00	0.69	0.83	0.94	1.0	1.1	1.1	1.1	1.2	0.66	0.79	0.89	0.96	1.0	1.1	1.1	1.1
TX2/TEX 2-0.3	01	1.2	1.5	1.7	1.9	2.0	2.0	2.1	2.1	1.1	1.4	1.5	1.7	1.8	1.8	1.9	1.9
TX2/TEX 2-0.6	02	1.7	2.1	2.4	2.6	2.8	2.9	2.9	3.0	1.5	1.9	2.2	2.3	2.5	2.6	2.6	2.7
TX2/TEX 2-0.8	03	3.0	3.8	4.3	4.7	5.0	5.2	5.3	5.3	2.7	3.4	3.9	4.2	4.4	4.6	4.7	4.8
TX2/TEX 2-1.2	04	4.4	5.6	6.4	6.9	7.3	7.6	7.8	7.9	3.9	5.0	5.7	6.2	6.5	6.8	7.0	7.1
TX2/TEX 2-1.5	05	5.6	7.1	8.1	8.7	9.3	9.6	9.9	10.0	5.0	6.4	7.2	7.8	8.3	8.6	8.8	9.0
TX2/TEX 2-2.0	06	6.8	8.7	9.8	10.7	11.3	11.8	12.1	12.3	6.1	7.8	8.8	9.6	10.1	10.5	10.8	11.0
TEX 5-3	01	8.1	10.2	11.6	12.5	13.3	13.8	14.2	14.4	7.2	9.0	10.2	11.1	11.7	12.2	12.5	12.7
TEX 5-4.5	02	11.3	14.2	16.1	17.4	18.5	19.2	19.7	20.0	10.1	12.6	14.3	15.4	16.4	17.0	17.5	17.8
TEX 5-7.5	03	16.4	20.7	23.5	25.6	27.3	28.6	29.5	30.0	14.6	18.3	20.8	22.7	24.2	25.4	26.2	26.8
TEX 5-12	04	23.5	29.6	33.6	36.6	39.0	40.8	42.1	42.8	20.9	26.3	29.8	32.5	34.6	36.3	37.5	38.2
TEX 12-4.5	01	11.3	14.5	16.4	17.8	18.8	19.6	20.0	20.3	10.2	13.1	14.8	16.0	16.9	17.6	18.0	18.3
TEX 12-7.5	02	18.5	23.6	26.8	29.0	30.7	31.9	32.7	33.2	16.8	21.4	24.2	26.2	27.7	28.8	29.5	29.9
TEX 12-12	03	28.8	34.2	38.9	42.3	45.0	46.9	48.3	49.1	24.3	30.9	35.1	38.1	40.5	42.4	43.7	44.5
TEX 12-18	04	35.4	45.3	51.7	56.6	60.4	63.4	65.6	67.0	32.0	40.8	46.6	51.0	54.6	57.4	59.6	61.0
TEX 20-20	01	46.0	58.0	66.0	72.0	76.0	80.0	82.0	83.0	41.0	52.0	59.0	65.0	69.0	72.0	74.0	76.0
TEX 55-35	01	100	127	143	155	163	169	173	174	91.0	115	129	139	146	151	155	156
TEX 55-60	02	154	194	218	236	249	258	264	267	140	175	197	212	224	232	237	240

Temperatura de evaporação -40°C																	
TX2/TEX 2-0.2	00	0.60	0.71	0.80	0.86	0.92	0.95	0.98	0.99	0.54	0.65	0.72	0.78	0.82	0.85	0.87	0.88
TX2/TEX 2-0.3	01	0.90	1.1	1.3	1.4	1.4	1.5	1.5	1.6	0.74	0.92	1.0	1.1	1.2	1.2	1.3	1.3
TX2/TEX 2-0.6	02	1.2	1.6	1.7	1.9	2.0	2.1	2.1	2.1	1.0	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.7	1.7
TX2/TEX 2-0.8	03	2.2	2.8	3.1	3.4	3.5	3.7	3.8	3.8	1.8	2.3	2.6	2.7	2.9	3.0	3.1	3.1
TX2/TEX 2-1.2	04	3.2	4.0	4.6	4.9	5.2	5.4	5.6	5.7	2.6	3.3	3.7	4.0	4.2	4.4	4.5	4.6
TX2/TEX 2-1.5	05	4.1	5.1	5.8	6.3	6.6	6.9	7.1	7.2	3.4	4.2	4.7	5.1	5.4	5.6	5.8	5.9
TX2/TEX 2-2.0	06	5.0	6.3	7.1	7.7	8.1	8.4	8.7	8.8	4.1	5.1	5.8	6.2	6.6	6.9	7.1	7.2
TEX 5-3	01	5.6	7.0	7.9	8.5	9.0	9.4	9.7	9.8	5.5	6.1	6.6	7.0	7.3	7.5	7.7	7.7
TEX 5-4.5	02	7.9	9.9	11.1	12.0	12.7	13.3	13.3	13.9	7.7	8.7	9.4	9.9	10.4	10.7	10.9	10.9
TEX 5-7.5	03	11.4	14.3	16.2	17.7	19.0	19.9	20.7	21.2	11.2	12.7	13.9	14.9	15.8	16.4	16.9	16.9
TEX 5-12	04	16.3	20.5	23.2	25.3	27.1	28.5	29.5	30.2	16.0	18.2	19.9	21.3	22.5	23.4	24.1	24.1
TEX 12-4.5	01	8.3	10.5	11.9	12.8	13.5	14.0	14.4	14.6	8.5	9.5	10.2	10.8	11.2	11.5	11.7	11.7
TEX 12-7.5	02	13.7	17.2	19.4	21.0	22.2	23.1	23.7	24.1	13.9	15.5	16.8	17.7	18.5	19.0	19.4	19.4
TEX 12-12	03	19.6	24.8	28.1	30.6	32.6	34.1	35.3	36.1	19.8	22.5	24.5	26.2	27.6	28.6	29.4	29.4
TEX 12-18	04	25.5	32.6	37.4	41.1	44.2	46.8	48.8	50.3	25.9	29.9	33.1	35.9	38.2	40.2	41.6	41.6
TEX 20-20	01	33.0	42.0	47.0	52.0	55.0	58.0	60.0	62.0	33.0	38.0	42.0	45.0	47.0	49.0	51.0	51.0
TEX 55-35	01	73.0	92.0	102	110	116	120	122	123	73.0	81.0	87.0	91.0	94.0	96.0	97.0	97.0
TEX 55-60	02	114	141	158	170	178	185	189	191	113	126	135	142	147	150	151	151

Temperatura de evaporação -55°C																	
TX2/TEX 2-0.2	00									0.50	0.60	0.66	0.71	0.75	0.77	0.79	0.80
TX2/TEX 2-0.3	01									0.64	0.79	0.88	0.95	1.0	1.0	1.1	1.1
TX2/TEX 2-0.6	02									0.9	1.1	1.2	1.3	1.4	1.4	1.4	1.4
TX2/TEX 2-0.8	03									1.6	1.9	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6	2.6
TX2/TEX 2-1.2	04									2.2	2.8	3.1	3.4	3.6	3.7	3.8	3.9
TX2/TEX 2-1.5	05									2.9	3.6	4.0	4.3	4.6	4.8	4.9	5.0
TX2/TEX 2-2.0	06									3.5	4.4	4.9	5.3	5.6	5.8	6.0	6.1
TEX 5-3	01									4.4	4.9	5.3	5.6	5.9	6.1	6.2	6.2
TEX 5-4.5	02									6.2	7.0	7.4	8.0	8.4	8.6	8.8	8.8
TEX 5-7.5	03									9.0	10.3	11.3	12.1	12.9	13.5	13.9	13.9
TEX 5-12	04									12.9	14.7	16.1	17.3	18.3	19.2	19.8	19.8
TEX 12-4.5	01		7.6	8.5	9.2	9.7	10.1	10.4	10.5								
TEX 12-7.5	02		12.5	14.0	15.1	16.0	16.7	17.2	17.5								
TEX 12-12	03		17.8	20.3	22.1	23.7	25.0	26.0	26.7								
TEX 12-18	04		23.3	27.0	30.0	32.6	34.8	36.7	38.2								
TEX 20-20	01		30.0	34.0	37.0	40.0	43.0	45.0	46.0								
TEX 55-30	01		66.0	73.0	78.0	82.0	84.0	86.0	87.0								
TEX 55-60	02		102	113	121	127	131	134	135								

Correção devido à variação do subresfriamento Δt_{sub}

Nota: Um subresfriamento insuficiente pode produzir evaporação instantânea (flash gas), o que poderá causar danos aos controles.

As capacidades de evaporação terão que ser corrigidas se o subresfriamento for diferente de 4K. A capacidade corrigida pode ser obtida dividindo-se a

capacidade necessária de evaporação pelo fator de correção a seguir. Poderá, então, ser feita a seleção com as tabelas anteriores.

Δt_{sub}	4 K	10 K	15 K	20 K	25 K	30 K	35 K	40 K	45 K	50 K
Fator de correção	1.00	1.06	1.11	1.15	1.20	1.25	1.30	1.35	1.39	1.44

Exemplo
Refrigerante = R-22
Capacidade de evaporação $Q_0 = 5$ kW

Subresfriamento = 10 K
Fator de correção segundo a tabela = 1,06
Capacidade corrigida = $5 \div 1,06 = 4,72$ kW

1 kW = 860 Kcal/h

11