

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ALIMENTOS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE ALIMENTOS

**MODELAGEM, SIMULAÇÃO E OTIMIZAÇÃO DE UM SISTEMA
DE REFRIGERAÇÃO CONTROLADO COM LÓGICA *NEBULOSA***

Proctor
VIVALDO SILVEIRA JÚNIOR

Este exemplar
corresponde a relação final da Tese defen-
dição por Vivaldo Silveira Júnior e aprova-
da pela Comissão
Julgadora em
20.12.95
[assinatura]
Engenheiro de Alimentos

Prof. Dr. José Antônio D. Rios

Orientador

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia de Ali-
mentos da Universidade Estadual de Campinas para
obtenção do título de Doutor em Engenharia de Ali-
mentos.

• Campinas / SP

1995

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL

*FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA F.E.A. - UNICAMP*

Silveira Jr., Vivaldo

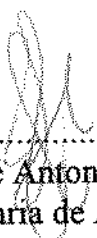
SI39m -- Modelagem, simulação e otimização de um sistema de refrigeração com lógica nebulosa / Vivaldo Silveira Jr. -- Campinas, SP : [s.n.], 1995.

Orientador: José Antonio Dermengi Rios.

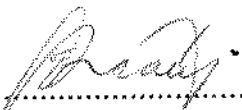
Tese (doutorado) - Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia de Alimentos.

1. *Simulação. 2. Refrigeração. 3. Controle. 4. *Lógica nebulosa.
I. Rios, José Antonio Dermengi. II. Universidade Estadual de
Campinas. Faculdade de Engenharia de Alimentos. III. Título.

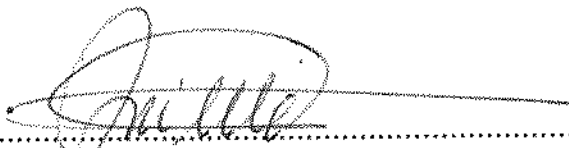
BANCA EXAMINADORA



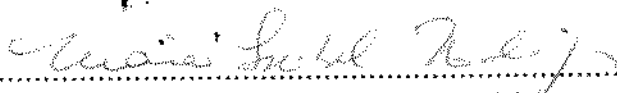
Prof. Dr. José Antonio Dermengi Rios
Depart. de Engenharia de Alimentos - UNICAMP



Prof. Dr. Evandro de Oliveira Araújo
Depart. de Eletrônica - Univ. Federal de Minas Gerais



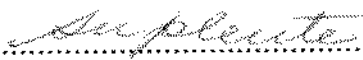
Prof. Dr. José Maria Saiz Jabardo
Depart. Eng. Mecânica - Escola de Eng. de São Carlos - USP



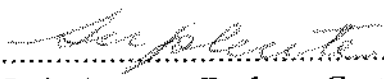
Profa. Dra. Maria Isabel Rodrigues
Depart. de Engenharia de Alimentos - UNICAMP



Prof. Dr. Theo Guenter Kieckbusch
Faculdade de Engenharia Química - UNICAMP



Prof. Dr. Milton Mori
Faculdade de Engenharia Química - UNICAMP



Prof. Dr. Luis Augusto Barbosa Cortez
Depart. de Construções Rurais - Fac. Eng. Agrícola - UNICAMP

RESUMO

O trabalho consiste numa comparação no desempenho de dois diferentes modos de controles, "on-off" (convencional) e *fuzzy* (nebuloso), sobre o coeficiente de performance termodinâmico (C.O.P.) quando aplicado a um modelo matemático dinâmico de um sistema de refrigeração de simples estágio usado no resfriamento de líquido (chiller), utilizando R-12, em regime transiente.

O desenvolvimento deste trabalho de simulação sobre um modelo matemático dinâmico de um sistema de refrigeração foi realizado em quatro partes inter-relacionadas:

1) **Otimização** do sistema de refrigeração com a obtenção da faixa ótima dos parâmetros de operação e de dimensionamento de uma planta a ser projetada em regime de operação variável. Foram utilizados os seguintes recursos: # programa de simulação de processos em regime permanente, o HYSIM; # métodos de planejamento experimental e análise de sensibilidade dos parâmetros e das variáveis do processo;

2) **Modelagem e simulação dinâmica** do sistema de refrigeração e avaliação de seu comportamento no regime transiente;

3) **Controle *Nebuloso*** : Apresentação da teoria de conjuntos nebulosos com aplicação em controles, mostrando as possibilidades da implementação desta lógica ao controle do processo modelado. Avaliação do comportamento do processo com a implementação da lógica *nebulosa* a diferentes funções de pertinência e modos de controle.;

4) **Comparação dos controles convencional e *nebuloso*** : Simulação do modelo dinâmico do processo implementado com as lógicas de controles convencional e *nebuloso*. Comparação dos resultados, salientando as diferenças quantitativas e qualitativas do coeficiente de performance para análise da viabilidade e vantagens do uso de cada uma das estratégias de controle.

SUMMARY

A comparison between two control modes, *on-off* (conventional) and *fuzzy*, is presented here in order to define a control strategy which will yield the better thermodynamic coefficient of performance (C.O.P.), where applied to a dynamic mathematical model for a single-stage refrigeration process that uses R-12 for liquid chilling.

This work was developed in four steps:

1) Optimization of a single stage refrigeration system establishing the optimum range of operation and project parameters in a plant at variable regime of operation. The following resource were used : # Process simulation program at stationary state, the HYSIM; # Experimental design methods and sensibility analysis of the process parameters and variables;

2) Dynamic modeling and simulation of the refrigeration system and evaluation of its behavior at transient state;

3) *Fuzzy Control*: Presentation of the theory of fuzzy sets relevance to control and showing the possibility of application of this control logic in programming the modeled process. Evaluation of the behavior at transient state were tested with different memberships functions. Applications and tests with the fuzzy logic control;

4) Comparison between the conventional and the fuzzy controls : Simulation of the implemented dynamic process model using the conventional and fuzzy logic control. Comparison of the results in terms of the quantitative and qualitative differences of the coefficient of performance, pointing at the feasibility and advantages application of each one the control strategies in refrigeration systems.

AGRADECIMENTOS

Ao Departamento de Engenharia de Alimentos desta Faculdade, pela liberação parcial de carga didática para a finalização deste trabalho.

Ao prof. Dr. José Antonio Dermengi Rios, pela infra-estrutura proporcionada e acompanhamento dispensado ao desenvolvimento deste trabalho, assim como pela idéia pioneira de aplicação de uma lógica de controle atualíssima em sistemas de refrigeração.

À profa. Dra. Maria Isabel Rodrigues, pelo tempo, pela atenção dispensada e pelo material oferecido para o desenvolvimento da etapa de otimização.

Ao Fernão Monteiro Mauger, aluno de iniciação científica, que codificou de forma brilhante o programa de simulação em linguagem "C".

Ao Joel Zukowsk Júnior, ex-aluno e orientado, que, enquanto graduando, iniciou o trabalho de codificação do programa de simulação.

À empresa H.I. Tecnologia que auxiliou na implementação de parte do código de comunicação de seu Micro Controlador Industrial e o SDAF (Sistema de Desenvolvimento de Aplicações *Fuzzy*).

À banca examinadora por prestar valiosas sugestões para a conclusão deste trabalho.

À Comissão de Pós-Graduação e suas secretárias, Telma e Cristiane, pelo desempenho do andamento do processo.

Ao Criador do cérebro !

NOMENCLATURA

a = coeficientes das correlações	-
C.O.P. = coeficiente de performance	-
C.O.P. ^o = coeficiente de performance de referência	-
Cp = calor específico	kJ/ kg °C
FS. = fator de sensibilidade das variáveis	%
L = comprimento de tubulação	m
h = entalpia específica	kJ/kg
M = massa	kg
$\dot{m}$ = vazão mássica	kg/h
n = número de ensaios ou variáveis	-
P _{desc} = pressão de descarga	Pa
P _o = pressão de evaporação	Pa
q = taxa de transmissão de calor	kJ/ s
q _o = carga térmica do circuito de Eglic.	kJ/ s
T = temperatura	°C
t = tempo	s
U = coeficiente global de transferência de calor (por unidade de área)	kJ/s.m ² °C
UA = coeficiente global de transferência de calor	kJ/s °C
V = vazão volumétrica do fluido especificado	m ³ /h

DENOMINAÇÕES :

Seg_suc = tubulação de sucção do refrigerante
 Seg_liq = tubulação do refrigerante líquido
 Seg_gl = tubulação de etileno glicol
 Seg_desc = tubulação de descarga do refrigerante
 Pump_gl = bomba de etileno glicol

GREGAS :

η = eficiência adiabática

ε = rugosidade absoluta	mm
-------------------------------	----

β = coeficientes das correlações multi-variáveis -
 ΔC_1 = diferença percentual entre C.O.P. do ensaio perturbado e o C.O.P. de ensaio de referência ..%
 ΔC_2 = diferença percentual entre o valor da variável perturbada e valor da variável de referência ..%
 ΔE = variação de energia do refrigerante kJ / s
 ϕ_{int} = diâmetro interno mm
 ΔP = perda de pressão na operação unitária Pa

Subscritos :

1 = condição de estado do refrigerante na sucção do compressor
 2 = condição de estado do refrigerante na descarga do compressor
 3 = condição de estado do refrigerante após condensador
 4 = condição de estado do refrigerante após sub-resfriador
 5 = condição de estado do refrigerante após válvula de expansão
 6 = condição de estado do refrigerante após evaporador
 A1 = condição de estado da água de resfriamento antes do condensador
 A2 = condição de estado da água de resfriamento após o condensador
 ag = água
 amb = ambiente
 comp = compressor
 cond = condensador
 eglic = etileno glicol
 ev = evaporador
 G1 = condição de estado do etileno glicol antes do evaporador
 G2 = condição de estado do etileno glicol após o evaporador
 liq = líquido
 o = referência
 ref = refrigerante
 s = superaquecido
 sat = saturado
 sub = sub-resfriado
 tank = reservatório de etileno glicol
 +1 = nível “+1” ; -1 = nível “-1” ; 0 = nível “0”

ÍNDICE

LISTA DE FIGURAS	x
LISTA DE TABELAS	xi
OBJETIVO GERAL.....	2
INTRODUÇÃO GERAL.....	2
I. OTIMIZAÇÃO.....	5
I. 1. INTRODUÇÃO.....	5
I. 2. DESCRIÇÃO DO SISTEMA.....	7
I. 3. METODOLOGIA.....	8
I. 3. 1. MÉTODO DE PLACKETT-BURMAN.....	9
I. 3. 2. PLANEJAMENTO FATORIAL COMPLETO / ESTRELA.....	12
I. 3. 3. TESTE DE PREFERÊNCIA ENTRE OS MODELOS.....	12
I. 3. 4. METODOLOGIA DE ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DOS PARÂMETROS.....	13
I. 4. RESULTADOS	14
I. 4. 1. RESULTADOS DA AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS DE OPERAÇÃO E DE PROJETO DO SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO EM CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO VARIÁVEIS.....	14
I. 4. 1. 1. RESULTADOS DAS RESPOSTAS EM SUPERFÍCIES	17
I. 4. 1. 2. ANÁLISE DAS SUPERFÍCIES DE RESPOSTAS.....	17
I. 4. 2. RESULTADOS DA AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS DE OPERAÇÃO DE UM SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO EM CONDIÇÃO FIXA DE OPERAÇÃO.....	18
I. 4. 2. 1. RESULTADOS DAS RESPOSTAS EM SUPERFÍCIES	20
I. 4. 2. 2. ANÁLISE DAS SUPERFÍCIES DE RESPOSTAS DO SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO DEFINIDO EM CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO FIXAS.....	21
I. 4. 3. RESULTADOS DA ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DE PARÂMETROS.....	22
I. 4. 4. ANÁLISE PARAMÉTRICA DO PROCESSO.....	24
I. 5. VALIDAÇÃO DO MODELO PROPOSTO	25
I. 6. CONCLUSÕES	28
CAPÍTULO II : MODELAGEM E SIMULAÇÃO DINÂMICA.....	30
II. 1. INTRODUÇÃO.....	30
II. 2. METODOLOGIA	31
II. 2. 1. MODELAGEM DE UM SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO PARA RESFRIAMENTO DE LÍQUIDO.....	31
II. 2. 2. MODELO MATEMÁTICO DE UM SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO PARA RESFRIAMENTO DE LÍQUIDO.....	32
II. 2. 2. 1. CORRELAÇÕES DE ESTADO PARA AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES TERMODINÂMICAS DE REFRIGERANTE.....	38
II. 2. 3. SIMULAÇÃO DE SISTEMAS FRIGORÍFICOS.....	42

II.2.3.1. DESENVOLVIMENTO DO PROGRAMA DE SIMULAÇÃO DO MODELO.....	42
II.2.3.2. MÉTODO DE SOLUÇÃO NUMÉRICA DAS EQUAÇÕES DIFERENCIAIS ORDINÁRIAS.....	44
II.3. MATERIAL.....	45
II.3.1. DESCRIÇÃO DO SIMULADOR DINÂMICO.....	45
II.4. RESULTADOS E ANÁLISES.....	46
II.5. CONCLUSÕES.....	51
III. CAPÍTULO : CONTROLE NEBULOSO.....	52
III.1. INTRODUÇÃO À LÓGICA NEBULOSA.....	52
III.1.1. LÓGICA NEBULOSA.....	53
III.1.2. TEORIA DE CONJUNTOS NEBULOSOS.....	54
III.1.3. CONTROLE NEBULOSO.....	56
III.1.3.1. FUNÇÃO DE PERTINÊNCIA.....	58
III.1.3.1.1. FUNÇÕES DE PERTINÊNCIA ESPECÍFICAS.....	60
III.1.3.2. REGRA NEBULOSA.....	61
III.1.3.2.1. IMPLICAÇÃO NEBULOSA.....	63
III.1.3.3. SISTEMA E CONTROLE NEBULOSOS.....	64
III.1.3.4. NEBULIZAÇÃO.....	65
III.1.3.5. DESNEBULIZAÇÃO.....	66
III.1.3.6. INFERÊNCIA NEBULOSA.....	70
III.2. MATERIAIS E MÉTODOS.....	71
III.2.1. MATERIAIS.....	71
III.2.1.1. MONTAGEM DO HARDWARE.....	72
III.2.2. METODOLOGIA.....	73
III.3. RESULTADOS.....	80
III.4. ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	83
III.5. CONCLUSÕES.....	87
CAPÍTULO IV . COMPARAÇÃO DO CONTROLE <i>NEBULOSO</i> E CONVENCIONAL.....	88
IV.1. INTRODUÇÃO.....	88
IV.2. MATERIAIS E MÉTODOS.....	88
IV.3. RESULTADOS.....	89
IV.4. ANÁLISES DOS RESULTADOS.....	91
IV.5. CONCLUSÕES.....	97
IV.6. SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS.....	98
V. BIBLIOGRAFIA.....	99

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 . ESQUEMA DE ANÁLISE DE PROCESSO.	6
FIGURA 2 . ESQUEMA DO SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO DE SIMPLES ESTÁGIO PARA RESFRIAMENTO DE ETILENO GLICOL.	7
FIGURA 3 . EFEITOS RELATIVOS DE CADA VARIÁVEL SOBRE O C.O.P. DO SISTEMA.	15
FIGURA 4 . EFEITOS RELATIVOS DAS VARIÁVEIS SOBRE O C.O.P. DO SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO.	19
FIGURA 5 . ESQUEMA DO SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO PARA RESFRIAMENTO DE EGlicol (BANCADA TD-30).	26
FIGURA 6 . A) SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO DE SIMPLES ESTÁGIO PARA RESFRIAMENTO DE LÍQUIDO; B) REPRESENTAÇÃO DO CICLO REAL NO DIAGRAMA $P \times H$	31
FIGURA 7 . DIAGRAMA DE BLOCOS SIMPLIFICADO DO PROGRAMA DE SIMULAÇÃO.	42
FIGURA 8 . ESQUEMA DA RELAÇÃO DO PROCESSO COM O CONTROLE.	43
FIGURA 9 . ERRO DOS VALORES DAS VARIÁVEIS COM RELAÇÃO AOS VALORES DE REGIME PERMANENTE.	48
FIGURA 10 . EXEMPLOS DE FUNÇÕES DE PERTINÊNCIA.	59
FIGURA 11 . EXEMPLOS DA CONCEITUAÇÃO DA TEMPERATURA AMBIENTE ATRAVÉS DOS CONJUNTOS CONVENCIONAIS E DOS CONJUNTOS NEBULOSOS.	60
FIGURA 12 . EXEMPLO DE NEBULIZAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE CONTORNO DE UM PROCESSO DE ESTERILIZAÇÃO.	61
FIGURA 13 . FLUXO DE DADOS EM MALHA DE CONTROLE PARA UM SISTEMA NEBULOSO.	65
FIGURA 14 . CONVERSÃO DA TEMPERATURA DO AMBIENTE PARA ROTAÇÃO DO MOTOR DO COMPRESSOR DE UM ACON- DIONADOR DE AR CONTROLADO ATRAVÉS DE REGRAS LINGÜÍSTICAS DA LÓGICA NEBULOSA. (FONTE : "THE ECONOMIST", 1994).	69
FIGURA 15 . MONTAGEM DO <i>HARDWARE</i> PARA O CONTROLE DO PROCESSO SIMULADO.	72

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 . ESPÉCIES DE VARIÁVEIS DE UM SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO DE SIMPLES ESTÁGIO	
TABELA 2 . VALORES DAS VARIÁVEIS EM DOIS NÍVEIS.	
TABELA 3 . EFEITOS ABSOLUTOS (EFX) DAS VARIÁVEIS SOBRE O C.O.P. DO SISTEMA.	
TABELA 4 . PARÂMETROS ESTATÍSTICOS PARA AVALIAÇÃO DO GRAU DE SIGNIFICÂNCIA DAS REGRESSÕES.	
TABELA 5 . VALORES DAS VARIÁVEIS PARA OS DIFERENTES NÍVEIS.	
TABELA 6 . EFEITOS DAS VARIÁVEIS SOBRE O C.O.P. DO SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO.	
TABELA 7 . VALORES DAS VARIÁVEIS EM SEUS NÍVEIS DE ENSAIO.	
TABELA 8 . RESULTADOS DO PLANEJAMENTO FATORIAL COMPLETO ESTRELA COM 3 VARIÁVEIS.	
TABELA 9 . FAIXA ÓTIMA DAS VARIÁVEIS COM RELAÇÃO AO C.O.P. DO SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO DEFINIDO EM REGIME DE OPERAÇÃO FIXO.	
TABELA 10 . VALORES ÓTIMOS DAS VARIÁVEIS DE PROCESSO E SEUS RESPECTIVOS C.O.P. DO SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO DEFINIDO EM REGIME DE OPERAÇÃO FIXO.	
TABELA 11 . RESULTADOS DA ANÁLISE DE SENSIBILIDADE COM O VALOR DA VARIÁVEL SUPERIOR À REFERÊNCIA.	
TABELA 12 . VALORES MÉDIOS DOS PARÂMETROS AJUSTADOS DAS OPERAÇÕES UNITÁRIAS.	
TABELA 13 . COMPARAÇÃO DOS VALORES SIMULADOS DO PROCESSO COM OS ENSAIOS EXPERIMENTAIS.	
TABELA 14 . VALORES DOS COEFICIENTES DAS CORRELAÇÕES DE ESTADO PARA R-12.	
TABELA 15 . CONDIÇÃO INICIAL ALEATÓRIA E VALORES DAS VARIÁVEIS EM DIFERENTES TEMPOS DE SIMULAÇÃO COM INCREMENTOS DE TEMPO DE $\Delta t = 0,005$ s.	
TABELA 16 . PROPOSIÇÃO DAS PERTURBAÇÕES A PARTIR DAS CONDIÇÕES ESTACIONÁRIAS.	
TABELA 17 . EFEITOS QUALITATIVOS DAS VARIÁVEIS DE PROCESSO SOB PERTURBAÇÃO EM DETERMINADO NÍVEL DAS VARIÁVEIS EXTERNAS (10 °C PARA TAI E 7.000 KJ/H PARA Q ₀).	
TABELA 18 . EFEITOS QUALITATIVOS DAS VARIÁVEIS DE PROCESSO DEVIDO À ATUAÇÃO DAS VARIÁVEIS DE CONTROLE.	
TABELA 19 . EXEMPLO DE FUNÇÕES DE ASSOCIAÇÃO DE VARIÁVEIS, EERIKAINEN ET ALII (1988).	
TABELA 20 . PROPOSIÇÃO DE DIFERENTES BASES DE REGRAS COM AS RESPECTIVAS VARIÁVEIS DE PROCESSO E DE CONTROLE.	
TABELA 21 . FAIXA DE NEBULIZAÇÃO/ DESNEBULIZAÇÃO DAS VARIÁVEIS DE PROCESSO E DE CONTROLE.	
TABELA 22 . FAIXA DE NEBULIZAÇÃO/ DESNEBULIZAÇÃO DAS VARIÁVEIS DE PROCESSO E DE CONTROLE.	
TABELA 23 . NÍVEIS DE PERTINÊNCIA DE CADA VARIÁVEL E PARÂMETROS PARA O TIPO TRIANGULAR.	
TABELA 24 . NÍVEIS DE PERTINÊNCIA DE CADA VARIÁVEL E PARÂMETROS PARA O TIPO TRIANGULAR.	
TABELA 25 . NÍVEIS DE PERTINÊNCIA DE CADA VARIÁVEL E PARÂMETROS PARA O TIPO SIGMOIDE/TRIANGULAR.	
TABELA 26 . CONDIÇÕES INICIAIS PARA A SIMULAÇÃO DO PROCESSO (CONDIÇÕES ESTACIONÁRIA).	
TABELA 27 . PROPOSIÇÃO DE ENSAIOS COM CONTROLE NEBULOSO COM DIFERENTES FUNÇÕES DE PERTINÊNCIA E A MESMA BASE DE REGRAS.	
TABELA 28 . PROPOSIÇÃO DE ENSAIOS COM CONTROLE NEBULOSO COM DIFERENTES BASES DE REGRAS E UMA MESMA FUNÇÃO DE PERTINÊNCIA.	
TABELA 29 . PROPOSIÇÃO DE ENSAIOS COM CONTROLE NEBULOSO COM DIFERENTES VALORES DE "SET-POINT", EM BASE EM REGRAS ESPECÍFICAS COM A MESMA FUNÇÃO DE PERTINÊNCIA.	
TABELA 30 . COMPORTAMENTO DO PROCESSO COM DIFERENTES PROPOSIÇÕES DE ENSAIOS.	

TABELA 31 . VALORES MÉDIOS DE TG1 E COP PARA OS ENSAIOS SOB CONTROLE <i>NEBULOSO</i> COM DIFERENTES FUNÇÕES DE PERTINÊNCIA E COM A MESMA BASE DE REGRAS (C . REG).	81
TABELA 32 . VALORES MÉDIOS DO MÓDULO DO ERRO DE TG1 E DO COP PARA OS ENSAIOS SOB CONTROLE <i>NEBULOSO</i> COM DIFERENTES FUNÇÕES DE PERTINÊNCIA E A MESMA BASES DE REGRAS (C . REG).	81
TABELA 33 . VALORES MÉDIOS DE TG1 E COP PARA OS ENSAIOS SOB CONTROLE <i>NEBULOSO</i> COM DIFERENTES BASES DE REGRAS COM AS FUNÇÕES DE PERTINÊNCIA SIGMOIDE / TRIANGULAR (TABELA 25).	81
TABELA 34 . VALORES MÉDIOS DO MÓDULO DO ERRO DE TG1 E DO COP PARA OS ENSAIOS SOB CONTROLE <i>NEBULOSO</i> COM DIFERENTES BASES DE REGRAS E COM AS FUNÇÕES DE PERTINÊNCIA SIGMOIDE / TRIANGULAR (TABELA 25).	82
TABELA 35 . VALORES MÉDIOS DE TG1 E COP PARA OS ENSAIOS SOB CONTROLE <i>NEBULOSO</i> COM A BASE DE REGRAS "B" E COM AS FUNÇÕES DE PERTINÊNCIA SIGMOIDE / TRIANGULAR (TABELA 25), EM DIFERENTES "SET-POINT".	82
TABELA 36 . VALORES MÉDIOS DO MÓDULO DO ERRO DE TG1 E DO COP PARA OS ENSAIOS SOB CONTROLE <i>NEBULOSO</i> NA BASE DE REGRAS "B" E COM AS FUNÇÕES DE PERTINÊNCIA SIGMOIDE / TRIANGULAR (TABELA 25), EM DIFERENTES "SET-POINT".	82
TABELA 37 . VALORES MÉDIOS DE TG1 E COP PARA OS ENSAIOS SOB CONTROLE <i>NEBULOSO</i> NA BASE DE REGRAS "C" COM AS FUNÇÕES DE PERTINÊNCIA SIGMOIDE / TRIANGULAR (TABELA 25), EM DIFERENTES "SET-POINT".	83
TABELA 38 . VALORES MÉDIOS DO MÓDULO DO ERRO DE TG1 E DO COP PARA OS ENSAIOS SOB CONTROLE <i>NEBULOSO</i> NA BASE DE REGRAS "C" E COM AS FUNÇÕES DE PERTINÊNCIA SIGMOIDE / TRIANGULAR (TABELA 25), EM DIFERENTES "SET-POINT".	83
TABELA 39 . PROPOSIÇÃO DE ENSAIOS COM CONTROLE "ON-OFF" A DIFERENTES "SET-POINT" DE TG1, UTILIZANDO PERTURBAÇÕES EM DEGRAU DE Q_0 DE 3.500 KJ/H E DIFERENTES BANDAS MORTA DE TG1.	89
TABELA 40 . VALORES MÉDIOS DE TG1 E COP PARA CONTROLE "ON-OFF" COM PERTURBAÇÃO EM DEGRAU DE + 3.500 KJ/H DE Q_0 PARA DIFERENTES BANDAS MORTA ($\Delta TG1$) E A DIFERENTES "SET-POINT" DE TG1.	90
TABELA 41 . VALORES MÉDIOS DO MÓDULO DO ERRO DE TG1 E DO COP PARA CONTROLE "ON-OFF" COM PERTURBAÇÃO EM DEGRAU DE + 3.500 KJ/H DE Q_0 PARA DIFERENTES BANDAS MORTA ($\Delta TG1$) E A DIFERENTES "SET-POINT" DE TG1.	90
TABELA 42 . DESVIOS DA TEMPERATURA CONTROLADA COM RELAÇÃO AO "SET-POINT" ESPECIFICADO PARA CADA BANDA MORTA DE CONTROLE.	91
TABELA 43 . RESULTADOS DE COP_{med} E $TG1_{med}$ PARA O PROCESSO CONTROLADO COM LÓGICAS "ON-OFF" E <i>NEBULOSA</i> COM PERTURBAÇÃO DE +3.500 KJ/H EM DEGRAU DE Q_0 .	92
TABELA 44 . DESVIOS DA TEMPERATURA MÉDIA DO ETILENO GLICOL ($TG1_{med}$) COM O "SET-POINT" PARA OS CONTROLES "ON-OFF" E <i>NEBULOSO</i> .	93
TABELA 45 . COMPARAÇÃO DOS VALORES DE COP PARA O PROCESSO CONTROLADO COM LÓGICA <i>NEBULOSA</i> E "ON-OFF" A DIFERENTES "SET-POINTS".	94
TABELA 46 . RESULTADOS DE $TG1_{med}$ E COP_{med} DO PROCESSO A DIFERENTES LÓGICAS DE CONTROLE A PARTIR DE UMA CONDIÇÃO INICIAL (TABELA 26), SET-POINT $TG1 = 25,75$ °C E PERTURBAÇÃO DE + 3.500 KJ/H EM DEGRAU DE Q_0 .	95
TABELA 47 . VALORES DA MÉDIA DO ERRO ABSOLUTO DE TG1 E COP PARA OS PROCESSOS PERTURBADO COM + 3.500 KJ/H PARA DIFERENTES LÓGICAS DE CONTROLE.	95

OBJETIVO GERAL

O objetivo deste trabalho é o de comparar e analisar a diferença do coeficiente de performance (C.O.P.), utilizando os controles *nebuloso* e "on-off" para uma condição de operação de um sistema de refrigeração de simples estágio, através de simulações dinâmicas de um modelo matemático.

INTRODUÇÃO GERAL

O dimensionamento e seleção de equipamentos de um sistema refrigeração são determinados em condições de operação pré-definidas, como por exemplo a capacidade máxima frigorífica (carga térmica : q_0) e temperaturas de operação (de evaporação e de condensação) de acordo com a aplicação e refrigerante utilizado (DOSSAT, 1985). Entretanto, as oscilações em relação a estas condições (ou variáveis de processo) podem ocasionar uma sub ou super-utilização do sistema, provocando maiores gastos de energia num regime real de operação.

A fim de racionalizar o consumo de energia elétrica em sistemas de refrigeração a compressão de vapor objetivou-se a obtenção do desempenho, expresso pelo C.O.P. , utilizando :

1) **Técnicas de otimização:** Planejamento experimental e análise de superfície de resposta, aplicado ao modelo do processo simulado em regime estacionário com um simulador profissional de processos, o HYSIM, e análise de sensibilidade.

Nesta etapa do trabalho, são identificadas as variáveis de maior efeito sobre o desempenho do sistema através de um planejamento experimental e de uma análise de sensibilidade do modelo proposto.

O modelo contempla algumas hipóteses simplificadoras entre as quais estão incluídos balanços de matéria e energia, propriedades termodinâmicas do refrigerante, condições de operação e regime permanente do processo. Estas hipóteses foram elaboradas de forma a não alterarem significativamente os resultados apresentados.

2) **Modelagem dinâmica e simulação** : modelagem matemática do processo dinâmico com uso de algoritmo de solução de equações diferenciais ordinárias.

A modelagem e simulação de um processo é uma ferramenta importante e versátil, em análises de performance relativas a alterações de condições de operação ou das próprias caracte-

rísticas dos equipamentos, fornecendo uma maior gama de resultados e subsídios a análise energética.

3) Aplicação da lógica *nebulosa* ("Fuzzy Logic") : Estudo da lógica *nebulosa*, avaliação das variabilidades de sua aplicação em sistemas de refrigeração.

Atualmente, os sistemas de refrigeração possuem controladores mecânicos dedicados a componentes específicos (com lógica de controle "on-off" ou proporcional) para algumas variáveis. O presente trabalho questiona sua operação em comparando a estratégias de controle mais sofisticadas, como aquela que utiliza a lógica *nebulosa*, para condições variáveis de operação, já que é esta a real ocorrência.

A proposta da aplicação do controle *Nebuloso* em sistemas de refrigeração é a de inter-relacionar todas as variáveis do processo e controlá-las com este algoritmo pré-parametrizado de forma facilitada.

A Lógica *Nebulosa* ("Fuzzy Logic ") é um ramo da matemática que experimentou um rápido avanço (ZADEH, 1965), em decorrência da adequação a processos de difícil descrição matemática, onde os métodos convencionais falham. Através desta nova abordagem tornou-se possível desenvolver ferramentas computadorizadas capazes de lidar com situações e sistemas caracterizados por definições "vagas", "imprecisas" e "subjettivas".

A rigidez da lógica convencional não permite classificar os fatos como parcialmente "verdadeiros" ou parcialmente "falsos". A lógica *nebulosa* como uma generalização da Lógica Clássica, possibilita o desenvolvimento de algoritmos computacionais capazes de fazer inferências a partir de informações imprecisas, num modo similar ao processo de raciocínio aproximado usado pelos operadores dos processos.

O espectro das aplicações, onde os sistemas *nebulosos* foram utilizados com sucesso, é bastante amplo englobando, entre outras, as seguintes áreas:

- * Controle de processos contínuos;
- * Sistemas de apoio e tomada de decisão;
- * Sistemas de controle dedicados.

A utilização de controladores *nebulosos* têm crescido cada vez mais na indústria para controlar processos complexos de difícil *modelagem* em substituição de controladores PID convencionais, adaptativos e outros, uma vez que eles solucionam de forma fácil o problema de automação a partir de informações linguísticas especialistas no comportamento do processo, ou seja através do banco de

conhecimento.

Assim este trabalho de modelamento e simulação dinâmica de um sistema de refrigeração baseado num sistema experimental, consiste em avaliar o comportamento deste processo sob perturbação e então implementar lógica de controle nebulosa subsidiada nas tendências e sensibilidades das variáveis de processo e de controle, a fim de adequar a outros circuitos reais e análogos.

O domínio do comportamento ou tendências das variáveis do processo possibilita prever as variações das condições de operação e então controlá-las de acordo com a estratégia de controle elaborada.

4) Comparação do controle *nebuloso* e convencional : À partir da construção de ferramentas (modelo matemático para simulação dinâmica) e geração de conhecimentos (tanto do comportamento deste processo sob perturbações como pelo seu comportamento corrigido pela atuação do controle com a lógica *nebulosa*) é possível realizar simulações em cenários comuns, a fim de comparar os comportamentos das variáveis e suas eficiências.

Assim, cada uma das partes contribuem com informações que subsidiam as etapas subsequentes com o objetivo principal de comparar o comportamento do processo de refrigeração numa aplicação específica a diferentes formas de controle ("on-off", frequentemente utilizada, e a *nebulosa*, proposição atualizada) numa mesma situação de operação e configuração do sistema.

Optou-se por viabilizar este estudo através de simulações, a fim de reduzir os custos decorrentes da experimentação em um sistema físico. Os resultados qualitativos e indicativos obtidos posteriormente podem ser compatibilizados com os fenômenos reais em trabalhos experimentais.

O atual trabalho de simulação e controle poderá ser complementado e validado por futuros trabalhos experimentais, avaliando a variação da performance do sistema de refrigeração com as alterações de: refrigerante, lógicas de controle, variáveis de controle, componentes do circuito frigorífico e outras.

I. OTIMIZAÇÃO

I. 1. INTRODUÇÃO

Um sistema de refrigeração é normalmente dimensionado para uma aplicação específica, com um regime de operação definido numa situação máxima de carga térmica (DOSSAT, 1985). Com isto, o sistema pode ficar super-dimensionado em condições sazonais (até mesmo diário) de troca de calor.

Como as condições climáticas ou as externas ao processo termodinâmico ocorrem na maioria das vezes em regime não estacionário, há a necessidade de controle das variáveis de processo numa condição ótima de operação, a fim de racionalizar o consumo de energia, modulando-as de acordo com a necessidade instantânea da aplicação.

O conhecimento prévio da influência dos parâmetros de dimensionamento e operacionais sobre o comportamento do processo é importante para a melhoria de seu desempenho e para otimização das respectivas faixas de operação.

Com este fim, a metodologia de planejamento experimental (BOX et alii, 1978 e PLACKETT-BURMAN, 1944) propõe combinações adequadas de variáveis para a realização de ensaios, cujos resultados servirão para estabelecer uma correlação multi-variável do comportamento do processo dentro da faixa estudada e para uma quantificação dos efeitos das variáveis sobre a performance do processo.

Admitindo-se que o processo proposto, o sistema de refrigeração de simples estágio, tivesse um comportamento indefinido para qualquer alteração de variável, propôs-se um estudo global, tanto para os parâmetros de projeto como para os de operação. A proposta de análise está esquematizada na figura 1.

Foi utilizado um software comercial para simulação de processos, o HYSIM (HYPROTECH, 1992), o qual permite a interligação de operações unitárias pré-configuradas, através de linhas de corrente de composição definida.

Cada operação unitária (trocador de calor, compressor, tubulação, válvulas, separador de líquido e outras) é configurada previamente, segundo seus respectivos parâmetros específicos (coeficiente global de transferência de calor " U ", produto do coeficiente global de transferência de calor e da área " UA ", eficiências " η ", rugosidade da tubulação " e ", comprimento de tubulação " L " e outros). Da mesma forma, as linhas de correntes podem conter misturas com composição pré-

estabelecidas ou componentes puros. As propriedades reológicas e condições de estado termodinâmicas são calculadas de acordo com modelos específicos selecionados do banco de dados do *software* (por exemplo : Peng-Robson, Seid e outros).

Após o processo esquematizado, seleciona-se algumas das grandezas físicas (temperatura, pressão, fração de vapor, vazão mássica e outras) para cada linha de corrente, a fim de que o simulador, o HYSIM, tenha informações mínimas para solucionar os balanços de matéria e de energia em cada operação unitária e no processo global em regime permanente, considerando inclusive os efeitos fluido-dinâmicos.



Figura 1 . Esquema de análise de processo.

1.2. DESCRIÇÃO DO SISTEMA

O circuito de refrigeração a ser estudado consiste em um sistema de simples estágio com refrigerante R-12, para resfriamento de solução de etileno glicol 30 %, cuja carga térmica é simulada com uma potência de aquecimento (q_0) num reservatório (tank), conforme esquema mostrado na figura 2. As simplificações consideradas pelo software HYSIM nesta simulação são: coeficientes médios de transferência de calor, efeitos fluido-dinâmicos nas tubulações e equipamentos, homogeneidade nas soluções, condições de saturação nas saídas do evaporador e condensador e tratamento global (não discretizado) de cada operação unitária utilizada.

O circuito proposto é aquele de uma bancada de ensaios de refrigeração, marca Tecquipment, modelo TD-30 . Os dados do sistema foram utilizados no modelo, o que permitiu sua validação posterior por comparação com ensaios de desempenho.

A especificação de cada operação unitária da bancada experimental TD-30 é descrita no manual de operação (TECQUIPMENT, 1973).

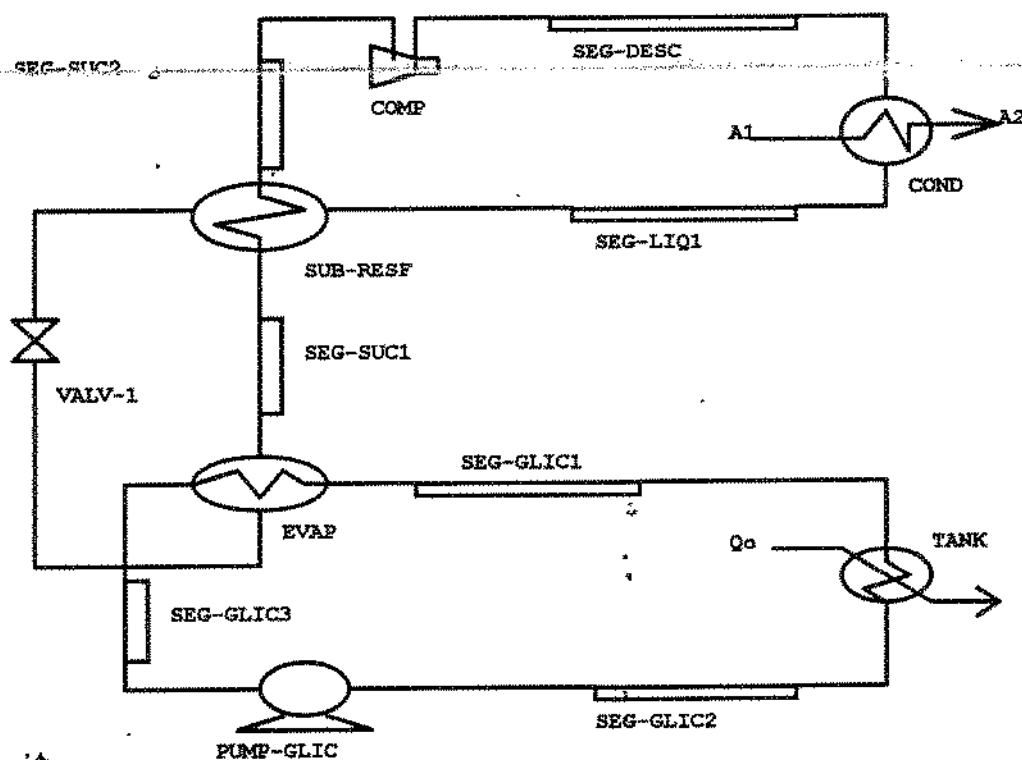


Figura 2 . Esquema do sistema de refrigeração de simples estágio para resfriamento de Etileno glicol.

1.3. METODOLOGIA

O uso de métodos sistemáticos de planejamento de ensaios proporciona resultados estatisticamente viáveis à análise, que possibilitam combinações de valores das variáveis [Métodos de Plackett-Burman (PLACKETT-BURMAN, 1944 e DU PONT COMPANY, 1988) e Planejamento Fatorial Completo Estrela (BOX et alii, 1978)] para a execução de experimentos.

Os ensaios foram realizados por simulação do processo, mostrado na figura 2, com auxílio do simulador em regime estacionário, o HYSIM, o qual possui um grau de liberdade para as diferentes configurações das variáveis, segundo exigência da metodologia experimental proposta.

A metodologia de planejamento de ensaios propõe combinações dos valores das diferentes variáveis consideradas, avaliando seus efeitos individuais e de interação, e possibilita a triagem dos parâmetros de maior efeito sobre a variável-resposta.

Caso o processo escolhido possua um grande número de variáveis, e não se conheça a intensidade do efeito individual sobre a variável-resposta, é preciso utilizar uma metodologia de triagem inicial das variáveis de maior influência. Esta metodologia pode ser o Planejamento de Plackett-Burman, onde já se tem definido a combinação dos valores das variáveis em níveis, relativa ao número de parâmetros em análise (Ex. : PB-36 com 35 parâmetros e 36 ensaios).

Detectadas as variáveis de maior efeito sobre a resposta, faz-se um planejamento completo, chamado Planejamento Fatorial Completo, o que propõe uma combinação de possibilidades de todas as variáveis em dois níveis de valores.

Para obtenção de uma correlação multi-variável de ordem quadrática se faz necessário incluir no planejamento completo mais duas combinações para cada variável no valor escalonado de +1,682 e -1,682, a fim de completar o planejamento completo estrela. Estes valores escalonados são parâmetros definidos para o planejamento experimental que possui três variáveis selecionadas, ou seja as mais importantes no efeito sobre a variável resposta.

A partir dos valores da variável-resposta de cada combinação realizada nos ensaios é possível obter uma correlação multi-variável (linear ou quadrática) que facilita a visualização do comportamento da resposta do processo de forma gráfica ou matemática.

Um sistema de refrigeração de simples estágio com R-12, cujo esquema está mostrado na figura 2, possui uma série de parâmetros a serem avaliados, tanto quanto para o seu dimensionamento quanto para a operacionalidade do processo.

As espécies de variáveis deste processo estão mostradas para cada operação unitária considerada na tabela 1.

Tabela 1 . Espécies de variáveis de um sistema de refrigeração de simples estágio.

OPERAÇÃO UNITÁRIA	VARIÁVEIS	DENOMINAÇÃO
COMPRESSOR	η [%]	Eficiência adiabática
TUBULAÇÃO	ϕ_{int} [mm]	Diâmetro interno
	L [m]	Comprimento da tubulação
	U [kJ/s°C.m²]	Coef. Global de transf. de calor
	ε [mm]	Rugosidade
	T _{amb} [°C]	Temp. ambiente para troca de calor
TROCADOR DE CALOR	ΔP_{tubo} [Pa]	Perda de pressão nos tubos do T.C.
	$\Delta P_{carcaca}$ [Pa]	Perda de pressão na carcaça do T.C.
	UA [kJ/s.°C]	Coef. global de transf. de calor por área
LINHAS DE CÔRRENTE	VARIÁVEIS	DENOMINAÇÃO
Vazão mássica	$\dot{m}$ [kg/h]	Vazão mássica (água, refrigerante e etileno glicol)
Carga Térmica	q _o [kJ/s]	Carga térmica interna do sistema
Temperaturas	T _{cond} [°C]	Temperatura de condensação
	T _{ev} [°C]	Temperatura de evaporação
	T _{amb} [°C]	Temperatura ambiente
	TA [°C]	Temperatura da água
	TG [°C]	Temperatura do etileno glicol

Conforme mostrado na figura 1, foram utilizados os Métodos de Planejamento Experimental de Plackett-Burman e o Método de Planejamento Fatorial Completo Estrela, com o intuito de abranger um elenco maior de possibilidades para análise deste tipo de processo numa situação de dimensionamento e operação de uma planta, para a obtenção de suas faixas ótimas.

1.3.1. MÉTODO DE PLACKETT-BURMAN

A triagem preliminar das variáveis (ou parâmetros) de maior efeito sobre o desempenho do sistema de refrigeração foi realizada pelo Método de Plackett-Burman (P-B) de dois níveis, o qual permite verificar a influência de cada variável sobre o processo multi-variável de 4 a 200 fatores.

A importância de utilizar o método de Plackett-Burman para a triagem das variáveis de maior influência sobre a variável-resposta estudada é devido a simplificação preliminar das inúmeras combinações possíveis para execução de um planejamento completo de um processo com muitas variá-

veis a serem analisadas. Uma vez que o processo em estudo possui 29 variáveis, então a quantidade de experimentos com todas as possibilidade de combinações em dois níveis é de 2^{29} (536.870.912) ensaios, o que inviabiliza o estudo global, caso não haja uma simplificação fundamentada das variáveis de menor efeito do ponto de vista do especialista.

Os parâmetros do sistema de refrigeração utilizados foram compilados do protótipo experimental. Propôs-se uma faixa de estudo dos valores dos parâmetros relativos à referência (nível "0"), sendo os valores máximos (" + "), centrais (" 0 ") e mínimos (" - ") de cada variável mostrados na tabela 2. As combinações dos ensaios utilizadas no Método PB-36 estão mostradas na tabela do anexo VI.1.1.

Tabela 2 . Valores das variáveis em dois níveis.

Variável	Parâmetros do Processo	Operação Unitária	NÍVEIS DOS VALORES			Unidades
			(- 1)	(0)	(+ 1)	
X1	$\dot{m}_{ref}$	R-12	75	125	175	kg/h
X2	$\dot{m}_{eglic}$	Eglicol	500	1000	1500	kg/h
X3	TA	Água	15	20	25	°C
X4	T_{cond}	R-12	30	35	40	°C
X5	T_{ev}	R-12	-10	0	10	°C
X6	T_{amb}	—	20	25	30	%
X7	$U \cdot 10^{-3}$	SEG-GL-(1 , 2 , 3)	833,3	1666,7	2500	kJ/s. °C m ²
X8	$\varepsilon \cdot 10^{-3}$	SEG-GL-(1 , 2 , 3)	47,5	51,3	57	mm
X9	ϕ_{int}	SEG-GL-(1 , 2 , 3)	25	27	30	mm
X10	ϕ_{int}	SEG-SUC-1 / SEG-SUC-2	17	19	22	mm
X11	$U \cdot 10^{-3}$	SEG-SUC-1 / SEG-SUC-2	833,3	1666,7	2500	kJ/s. °C m ²
X12	$\varepsilon \cdot 10^{-5}$	SEG-SUC-1 / SEG-SUC-2	102	114	132	mm
X13	ϕ_{int}	SEG-DESC / SEG-LIQ-1	10	10,7	12	mm
X14	$U \cdot 10^{-3}$	SEG-DESC / SEG-LIQ-1	1388,9	2777,8	4166,7	kJ/s. °C m ²
X15	$\varepsilon \cdot 10^{-5}$	SEG-DESC / SEG-LIQ-1	60	64,2	72	mm
X16	L	SEG-DESC	0,5	1,0	1,5	m
X17	L	SEG-LIQ-1	0,55	1,1	1,65	m
X18	L	SEG-SUC-2	0,15	0,3	0,45	m
X19	L	SEG-SUC-1	0,75	1,5	2,25	m
X20	L	SEG-GL-3	0,25	0,5	0,75	m
X21	L	SEG-GL-1	2,25	4,5	6,75	m
X22	L	SEG-GL-2	0,35	0,7	1,05	m
X23	η	COMPRESSOR	65	75	85	%
X24	U.A	CONDENSADOR	277,8	555,6	833,3	kJ / s °C
X25	U.A	SUB-RESF	55,6	83,3	111,1	kJ / s °C
X26	U.A	EVAPORADOR	277,8	361,1	444,4	kJ / s °C
X27	η	PUMP-GL	65	75	85	%
X28	$\Delta P \cdot 10^5$	TANK	0,1	0,2	0,3	Pa
X29	$\Delta P_{tubo-ev} \cdot 10^5$	EVAPORADOR	0,1	0,3	0,5	Pa

A variável-resposta avaliada foi o C.O.P. , calculado pela seguinte expressão :

$$C.O.P. = \frac{\Delta E_{ev}}{E_{comp}} \quad (1)$$

onde, $E_{comp} = \Delta E_{cond} - \Delta E_{ev}$ é considerada como a energia útil de um ciclo ideal com :

$$\Delta E_{ev} = E_{ev_out} - E_{ev_in} \quad e \quad \Delta E_{cond} = E_{cond_out} - E_{cond_in} \quad (2)$$

sendo que ΔE_{ev} e ΔE_{cond} poderiam ser calculados pela variação de energia dos fluidos que estão envolvidos nas trocas térmicas, etileno glicol e água, respectivamente.

Efetuada os ensaios propostos no Método de PB-36 e calculadas as respectivas respostas, pode-se obter os efeitos individuais das variáveis sobre a variável-resposta por :

$$EF_X = (\sum R^+ - \sum R^-) / np \quad (3)$$

onde,

EF_X = efeito individual da variável "X" sobre a variável resposta

$\sum R^+$ = somatória dos valores da variável-resposta (no caso, o C.O.P.), em todos os ensaios em que a variável em questão foi ensaiada em seu nível superior (+) ;

$\sum R^-$ = somatória dos valores da variável-resposta (no caso, o C.O.P.), em todos os ensaios em que a variável em questão foi ensaiada em seu nível inferior (-) ;

np = quantidade de ensaios realizados com a variável em questão em seu nível superior (ex.: para PB-36 tem-se $np = 18$) .

Após a verificação dos efeitos individuais de cada variável sobre a variável-resposta pelo método PB, seleciona-se as de maior efeito e realiza-se o Planejamento Fatorial Completo e/ou o Planejamento Fatorial Completo Estrela .

O efeito global, segundo Du Pont (1988) é calculado pela média da variável resposta obtida nos ensaios do respectivo planejamento experimental.

I. 3 . 2 . PLANEJAMENTO FATORIAL COMPLETO / ESTRELA

O Planejamento Fatorial Completo de ensaios pode ser realizado em 2 ou 3 níveis da faixa estudada de cada variável.

Para o caso de um planejamento em 2 níveis, a quantidade de ensaios ou combinações é de 2^n , onde " n " é o número de variáveis do processo.

O Planejamento Fatorial Completo Estrela complementa o Planejamento Fatorial completo em 2.n ensaios em outros dois níveis diferentes (+1,682 e -1,682), para o caso de três variáveis.

I. 3 . 3 . TESTE DE PREFERÊNCIA ENTRE OS MODELOS

Uma vez que todos os modelos testados satisfazem a condição de significância, avalia-se a preferência entre os modelos, como justificativa metodológica.

O Teste de Preferência entre os modelos se resume em calcular o fator "F", mostrado abaixo, e então compará-lo com valor tabelado.

O fator "F" é definido como :

$$F = \frac{(SSE_{red} - SSE_{comp}) / r}{SSE_{comp} / (n - p)} \quad (4)$$

onde :

SSE_{red} = soma dos quadrados dos desvios do modelo reduzido (ou linear)

SSE_{comp} = soma dos quadrados dos desvios do modelo completo (ou quadrático)

n = número de ensaios - 1

p = número de parâmetros do modelo completo *

r = diferença entre o número de parâmetros do modelo completo e o número de parâmetros do modelo reduzido.

I. 3. 4 . METODOLOGIA DE ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DOS PARÂMETROS

Uma forma quantitativa de expressar o grau de influência de um parâmetro sobre a variável-resposta em observação é dado pelo fator de sensibilidade.

O fator de sensibilidade (F.S.) é calculado como a razão entre a variação em porcentagem dos parâmetros de saída e a variação em porcentagem dos parâmetros de entrada. Este fator indica o ganho no estado estacionário, ou seja , o quanto varia o parâmetro de saída, em relação à variação do parâmetro de entrada :

$$F.S. = \Delta C_1 / \Delta C_2 \quad (5)$$

onde :

ΔC_1 é a razão percentual entre a diferença entre o valor da variável-resposta obtida com a perturbação e o valor da variável-resposta nas condições de referência, e seu valor nas condições de referência, isto é :

$$\Delta C_1 = [(C_1 - C_1^*) / C_1^*] \cdot 100 \quad (6)$$

ΔC_2 é a razão percentual entre a diferença entre o valor da variável de entrada alterada para perturbação e o valor da variável de entrada nas condições de referência e a variável de entrada nas condições de referência, ou seja:

$$\Delta C_2 = [(C_2 - C_2^*) / C_2^*] \cdot 100 \quad (7)$$

I. 4 . RESULTADOS

I.4 . 1 . RESULTADOS DA AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS DE OPERAÇÃO E DE PROJETO DO SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO EM CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO VARIÁVEIS

Os efeitos individuais dos parâmetros de operação e de projeto de um sistema de refrigeração em condições de operação variáveis foram determinados, mostrados na tabela 3, utilizando o Método de P-B com 36 ensaios (combinações de ensaios mostrados na tabela do anexo VI.1.1.), conforme equação (3), com os quais foram graficados os efeitos relativos de cada variável referentes ao efeito global do C.O.P. do sistema, definido como $(EF_x / EF_{global}).100$, conforme a figura 3.

Dos resultados obtidos no método PB-36, foram selecionadas seis variáveis de maior efeito sobre o C.O.P., as quais são : T_{ev} , T_{cond} , η_{comp} , ΔP_{ev} , UA_{cond} e L_{desc} , a fim de efetuar o método de planejamento fatorial completo.

O planejamento fatorial completo para 6 variáveis é mostrado na tabela do anexo VI.1.2. com os valores dos C.O.P. dos respectivos ensaios.

Tabela 3 . Efeitos absolutos (EF_x) das variáveis sobre o C.O.P. do sistema.

	VARIÁVEIS							
	m_{ref}	m_{glie}	T_{ag_in}	T_{cond}	T_{ev}	T_{amb}	$U_{seg\ Epl}$	$\epsilon_{seg\ Epl}$
EFEITOS	0,240	-0,037	-0,051	-2,363	4,222	-0,172	0,325	-0,011
	$\phi_{int\ seg\ Epl}$	$\phi_{int\ seg\ suc}$	$U_{seg\ suc}$	$\epsilon_{seg\ suc}$	$\phi_{int\ seg\ des}$	$U_{seg\ des}$	$\epsilon_{seg\ des}$	$L_{seg\ des}$
EFEITOS	-0,272	-0,081	-0,097	0,145	-0,362	0,195	0,063	0,436
	$L_{seg\ liq1}$	$L_{seg\ suc2}$	$L_{seg\ suc1}$	$L_{seg\ Epl3}$	$L_{seg\ Epl1}$	$L_{seg\ Epl2}$	η_{comp}	UA_{cond}
EFEITOS	0,022	0,104	-0,071	0,144	-0,075	-0,098	1,887	0,476
	η_{pump}	UA_{sub}	UA_{ev}	ΔP_{tank}	ΔP_{ev}	GLOBAL		
EFEITOS	-0,299	-0,073	0,345	-0,184	0,533	5,726		

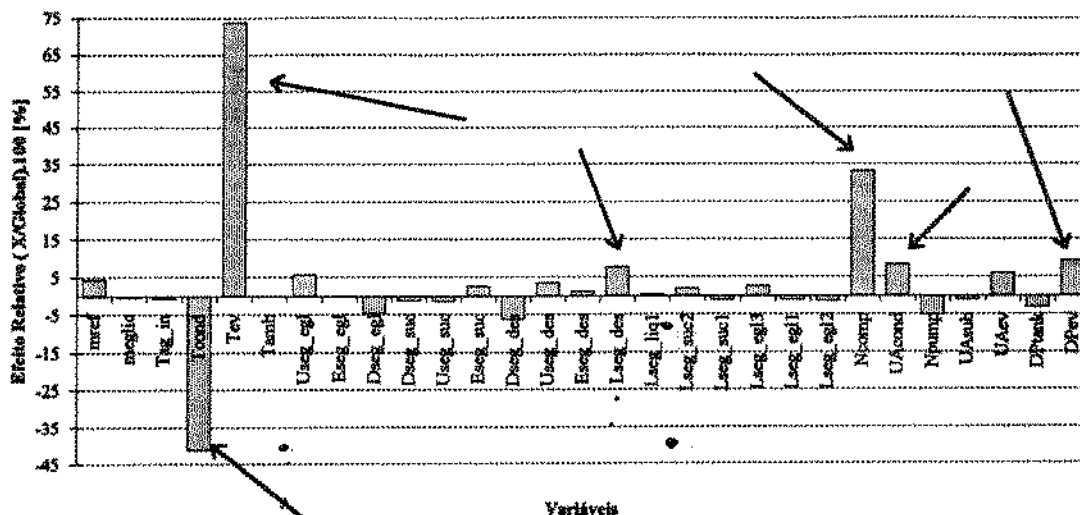


Figura 3 . Efeitos relativos de cada variável sobre o C.O.P. do sistema.

Com os resultados obtidos neste planejamento experimental, foram obtidos os efeitos de cada variável sobre o C.O.P. de até 2ª ordem , mostrados a seguir:

- efeito global : 5,7151

- efeito de 1ª ordem : $T_{ev} = 4,1364$; $T_{cond} = -2,1556$;

$\eta_{comp} = 1,5207$; $\Delta P_{ev} = -0,0011$;

$UA_{cond} = 0,0001$; $L_{desc} = 0,0005$.

- efeito de 2ª ordem : $T_{ev} \cdot T_{cond} = -1,2140$; $T_{ev} \cdot \eta_{comp} = 0,5504$;

$T_{cond} \cdot \eta_{comp} = -0,2822$; $T_{ev} \cdot \Delta P_{ev} = -0,0003$

Os efeitos de 1ª ordem referem-se ao grau de influência que as variáveis afetam individualmente a variável resposta e os de ordem superior referem-se a influência da interação entre as variáveis.

Foram selecionadas as variáveis : T_{ev} , T_{cond} e η_{comp} como as principais que afetam o C.O.P. até 2ª ordem , uma vez que as variáveis ΔP_{ev} , UA_{cond} e L_{desc} mostraram-se com baixa influência.

Selecionadas as três variáveis que mais afetam a variável-resposta, então realizou-se o planejamento fatorial completo estrela para obtenção de uma correlação multi-variável como modelo de significância no comportamento do processo, a partir dos respectivos valores individuais das variáveis e suas respostas de cada ensaio.

Os ensaios (ou simulações) do Planejamento Fatorial Completo Estrela de três variáveis, com

as 14 combinações e os respectivos resultados do C.O.P., estão mostrados na tabela do anexo VI.1.3.

Conforme a tabela 4, os fatores “F” calculados para os modelos linear e quadrático são superiores aos tabelados. Assim estes modelos são válidos nos dois níveis de significância (95 e 99 %). Foi selecionado o modelo quadrático por apresentar um melhor coeficiente de correlação.

Tabela 4 . Parâmetros estatísticos para avaliação do grau de significância das regressões.

FONTE DE VARIAÇÃO	MODELO	
	LINEAR	QUADRÁTICO
Regressão	3	9
Desvio	10	4
Total da Variação	13	13
Coeficiente correlação	0,954	0,993
Fator “F” calculado	34,146	88,298
Fator “F” Tab. 95 %	F(3,10) = 3,71	F(9,4) = 6,0
Fator “F” Tab. 99 %	F(3,10) = 6,55	F(9,4) = 14,56

Os valores das variáveis nos diferentes níveis, mostrados na tabela 5, foram utilizados nos respectivos ensaios com o valor dos outros parâmetros igual ao do nível “zero” , dos quais obteve-se a seguinte correlação multi-variável de ordem quadrática :

A correlação multi-variável quadrática utilizada foi obtida com os valores escalonados das variáveis em quatro níveis (ou seja, em - 1,682 , -1 , 0 , +1 , +1,682) , relativos aos valores reais das variáveis dadas na tabela 5 .

$$\begin{aligned}
 \text{C.O.P.} = & 5,6955 + 2,1691 \cdot T_{ev} - 0,9793 \cdot T_{cond} + 0,7202 \cdot \eta_{comp} + 0,4127 \cdot T_{ev}^2 + \\
 & - 0,1398 \cdot T_{cond}^2 - 0,2562 \cdot \eta_{comp}^2 - 0,6042 \cdot T_{ev} \cdot T_{cond} + \\
 & + 0,2759 \cdot T_{ev} \cdot \eta_{comp} - 0,1419 \cdot T_{cond} \cdot \eta_{comp}
 \end{aligned}
 \tag{8}$$

Tabela 5 . Valores das variáveis para os diferente níveis.

Variáveis	Valores dos Níveis				
	-1,682	-1	0	+1	+1,682
T _{ev} [°C]	-16,8	-10,0	0,0	10,0	16,8
T _{cond} [°C]	26,6	30,0	35,0	40,0	43,4
η _{comp} [%]	58,18	65,0	75,0	85,0	91,82

I.4.1.1. RESULTADOS DAS RESPOSTAS EM SUPERFÍCIES

A representação gráfica do valor do C.O.P. do processo com a variação de duas a duas variáveis, dentro de cada faixa estudada, ilustra as tendências do comportamento do processo, ou do modelo sugerido.

Para cada superfície de resposta obtida, utilizou-se diferentes valores (níveis: -1, 0, +1) da variável fixa, conforme mostrado nas figuras do anexo VI.2.1.

I.4.1.2. ANÁLISE DAS SUPERFÍCIES DE RESPOSTAS

A avaliação da aplicação dos Métodos de Planejamento Experimental no sistema de refrigeração constatou que os parâmetros de projeto têm pequena influência sobre a variável-resposta, o C.O.P., o que possibilitou uma simplificação na análise com apenas as variáveis de operação.

Avaliando os gráficos de superfícies, referentes ao sistema de refrigeração em condições de operação variáveis, figuras do anexo VI.2.1., verifica-se que:

a) Obviamente, os maiores C.O.P.s. para o sistema de refrigeração proposto, ocorrem para maiores temperaturas de evaporação, para menores T_{cond} e para maiores eficiências do compressor. Entretanto, esta relação não é linear, como pode ser visto pelas derivadas parciais, a seguir:

$$\left. \begin{aligned} \partial \text{C.O.P.} / \partial T_{cond} &= -0,9793 - 0,2796 \cdot T_{cond} - 0,6042 \cdot T_{ev} - 0,1419 \cdot \eta_{comp} \\ \partial \text{C.O.P.} / \partial \eta_{comp} &= -0,7202 - 0,1419 \cdot T_{cond} + 0,2759 \cdot T_{ev} - 0,5120 \cdot \eta_{comp} \\ \partial \text{C.O.P.} / \partial T_{ev} &= 2,1691 - 0,6042 \cdot T_{cond} + 0,8254 \cdot T_{ev} + 0,2759 \cdot \eta_{comp} \end{aligned} \right] \quad (9)$$

b) Observa-se também que há tendência semelhante de comportamento do C.O.P. com os três níveis da variável fixada (-1, 0 e +1).

c) Há uma grande diferença do valor do C.O.P. em cada nível (-1, 0 e +1) da variável fixada, quando observado na condição das outras duas fixas.

d) Há diferenças na intensidade da variação do C.O.P. com relação a uma variável para um mesmo nível da variável fixa.

Estas diferenças também podem ser vistas pelas equações da variação do C.O.P. com

relação a qualquer uma das variáveis mostradas no item “a” desta seção.

No entanto, os valores ótimos de operação foram obtidos dentro do intervalo de estudo, como sendo próximos aos limites de melhor operação das variáveis, conforme mostrado a seguir :

$$T_{ev} = > 10\text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_{cond} = < 30\text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\eta_{comp} = > 85\%$$

I . 4 . 2 . RESULTADOS DA AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS DE OPERAÇÃO DE UM SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO EM CONDIÇÃO FIXA DE OPERAÇÃO

Já foi verificado, no caso anterior, que para a faixa de estudo das variáveis, os parâmetros de dimensionamento não apresentaram influência sobre a variável resposta. Sendo assim, optou-se por avaliar um sistema de refrigeração já definido numa condição fixa de operação (temperatura de evaporação de 0° C e a temperatura de condensação de 35° C), onde o número de variáveis reduziu a oito. Assim utilizou-se o método de PB-12 para uma triagem inicial de 8 variáveis do processo.

Como resultado da triagem pelo Método de PB-12, foram obtidas as variáveis de maior efeito sobre o C.O.P. do sistema (η_{comp} , m_{ref} e T_{amb}). Os efeitos de cada variável são mostrados na tabela 6 e os efeitos relativos são mostrados na figura 4. Observa-se que a eficiência do compressor (η_{comp}) é expressivamente uma das variáveis de maior efeito, razão pela qual são mostrados na figura 4, apenas os efeitos relativos das outras que possuem valores da mesma ordem de grandeza.

Tabela 6 . Efeitos das variáveis sobre o C.O.P. do sistema de refrigeração.

	VARIÁVEIS								GLOBAL
	m_{ref}	m_{Eglic}	T_{ag-in}	T_{amb}	η_{comp}	η_{pump}	ΔP_{tank}	ΔP_{evap}	
Efeitos	-0,069	0,008	-0,008	-0,024	1,320	0,004	0,003	-0,005	4,966

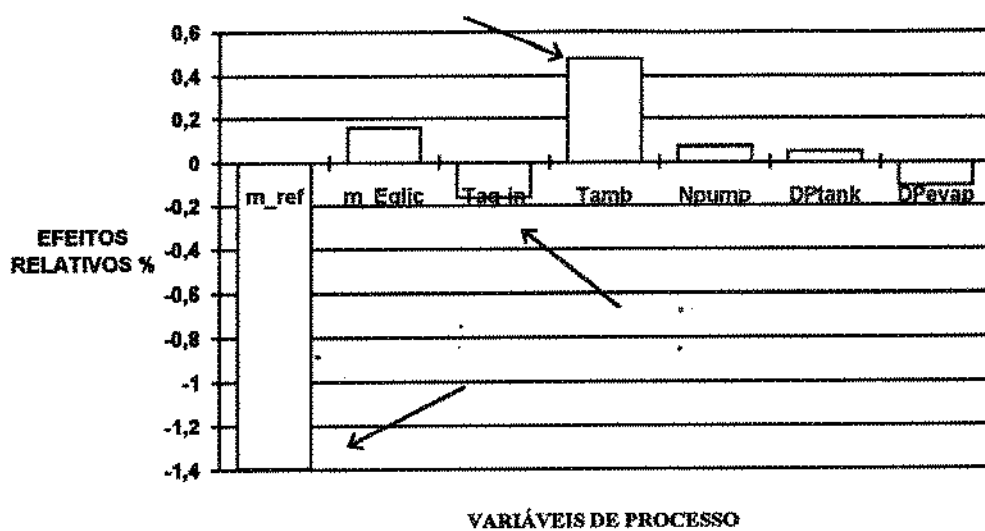


Figura 4 . Efeitos relativos das variáveis sobre o C.O.P. do sistema de refrigeração.

Selecionadas as variáveis (T_{amb} , m_{ref} e η_{comp}), realizou-se o planejamento fatorial completo estrela a fim de obter uma correlação multi-variável de ordem quadrática ou linear.

Os valores das variáveis nos diferentes níveis a serem utilizados nos ensaios estão mostrados na tabela 7.

Tabela 7 . Valores das variáveis em seus níveis de ensaio.

VARIÁVEL	VALORES DAS VARIÁVEIS				
	N Í V E I S				
	-1,682	-1	0	+1	+1,682
η_{comp}	58,18	65,0	75,0	85,0	91,82
m_{ref}	40,9	75,0	125,0	175,0	209,1
T_{amb}	16,6	20,0	25,0	30,0	33,4

Os resultados do planejamento fatorial completo estrela dos 14 ensaios, conforme combinação mostrada no anexo VI.1.3., são mostrados na tabela 8 :

Tabela 8 . Resultados do Planejamento fatorial completo Estrela com 3 variáveis.

	ENSAIOS						
	01	02	03	04	05	06	07
C.O.P.	4,3497	5,6900	4,2801	5,5977	4,3214	5,6445	4,2670
	08	09	10	11	12	13	14
C.O.P.	5,5764	3,8529	6,0780	5,0344	4,9038	4,9850	4,9478

Observa-se que, para a realização destes ensaios, mantiveram-se os valores das outras variáveis no nível "0".

Com os resultados dos ensaios realizados neste planejamento obtiveram-se regressões multi-variáveis linear e quadrática, cujos coeficientes de correlação foram 0,999 e 1,000 e valores do Teste "F" foram 30886,45 e 6177,51, respectivamente.

Uma vez que os modelos multi-variáveis linear e quadrático são ambos significativos a 99 %, segundo o valor de "F" para o teste de preferência entre modelos, utilizou-se o segundo, equação (10), modelo para a representação do processo e para análise gráfica com resposta em superfície.

O modelo matemático que prevê o C.O.P. de um sistema de refrigeração já definido em condições fixas ($T_{ev} = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $T_{cond} = 35\text{ }^{\circ}\text{C}$) de operação é :

$$\begin{aligned} \text{C.O.P.} = & 5,0689 + 0,6584 \cdot \eta_{comp} - 0,034 \cdot \dot{m}_{ref} - 0,0096 \cdot T_{amb} + \\ & - 0,0366 \cdot \eta_{comp}^2 - 0,0353 \cdot \dot{m}_{ref}^2 - 0,0362 \cdot T_{amb}^2 + \\ & + 0,0005 \cdot \eta_{comp} \cdot \dot{m}_{ref} + 0,0018 \cdot \eta_{comp} \cdot T_{amb} - 0,0001 \cdot \dot{m}_{ref} \cdot T_{amb} \quad (10) \end{aligned}$$

onde os valores das variáveis estão escalonados, cujos valores variam de -1 a +1.

I. 4. 2. 1. RESULTADOS DAS RESPOSTAS EM SUPERFÍCIES

A análise do sistema de refrigeração em regime de operação fixo constatou que os parâmetros de projeto têm pequena influência sobre os efeitos na variável-resposta. Assim, uniformizou-se a predição do C.O.P. pelo modelo matemático mostrado no item anterior, evidenciando as variáveis.

O comportamento da variável-resposta do processo, o C.O.P. do sistema de refrigeração, com relação às variáveis T_{amb} , $\dot{m}_{ref}$ e η_{comp} , duas a duas, dentro da faixa de estudo, é mostrado nas figuras do anexo VI.2.2., onde é graficado o modelo quadrático multi-variável em 3 níveis de cada variável fixa (-1, 0 e +1).

I.4.2.2. ANÁLISE DAS SUPERFÍCIES DE RÊSPÓSTAS DO SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO DEFINIDO EM CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO FIXAS.

Avaliando as figuras do anexo VI.2.2. , observa-se que :

a) A alteração da variável fixada em cada um dos níveis (-1, 0 e +1) não produziu diferenças acentuadas do C.O.P. para os mesmos valores das outras duas variáveis. A alteração da eficiência do compressor é a que mais produz diferenças no C.O.P. .

b) Há diferenças da variação do C.O.P. com relação a cada variável para um mesmo nível de uma das variáveis fixadas, segundo as derivadas parciais a seguir:

$$\left. \begin{aligned} \partial \text{C.O.P.} / \partial T_{\text{amb}} &= -0,0096 - 0,0724 \cdot T_{\text{amb}} + 0,0018 \cdot \eta_{\text{comp}} - 0,0001 \cdot \dot{m}_{\text{ref}} \\ \partial \text{C.O.P.} / \partial \dot{m}_{\text{ref}} &= -0,034 - 0,0001 \cdot T_{\text{amb}} + 0,0005 \cdot \eta_{\text{comp}} - 0,0706 \cdot \dot{m}_{\text{ref}} \\ \partial \text{C.O.P.} / \partial \eta_{\text{comp}} &= 0,6584 + 0,0018 \cdot T_{\text{amb}} - 0,0732 \cdot \eta_{\text{comp}} + 0,0005 \cdot \dot{m}_{\text{ref}} \end{aligned} \right] \quad (11)$$

A partir das figuras em análise, são obtidas as faixas ótimas das variáveis dentro do intervalo em estudo, como mostrado na tabela 9.

Tabela 9 . Faixa ótima das variáveis com relação ao C.O.P. do Sistema de Refrigeração Definido em regime de operação fixo.

VARIÁVEL	FAIXA ÓTIMA DE OPERAÇÃO
$T_{\text{amb}} [^{\circ}\text{C}]$	22 a 26
$\dot{m}_{\text{ref}} [\text{kg/h}]$	80 a 120
$\eta_{\text{comp}} [\%]$	> 85
C.O.P. [-]	5,65 a 5,7

Em virtude da imprecisão de uma análise gráfica, aplicou-se o método de maximização na correlação do C.O.P. do processo. Os pontos dos valores ótimos das variáveis nos três níveis da eficiência do compressor com seu respectivo valor da variável resposta, são dados na tabela 10 .

$$\left. \begin{aligned} \partial \text{C.O.P.} / \partial T_{\text{amb}} &= 0 \\ \partial \text{C.O.P.} / \partial \dot{m}_{\text{ref}} &= 0 \\ \partial \text{C.O.P.} / \partial \eta_{\text{comp}} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

Tabela 10 . Valores ótimos das variáveis de processo e seus respectivos C.O.P. do Sistema de Refrigeração definido em regime de operação fixo.

		VALORES ÓTIMOS		
η_{comp}		$\dot{m}_{\text{ref}}$	T_{amb}	C.O.P.
Absoluto	65 %	100,58 [kg/h]	24,22 [°C]	4,383
Escalonado	- 1	- 0,4885	- 0,1571	
Absoluto	75 %	100,93 [kg/h]	24,34 [°C]	5,083
Escalonado	0	- 0,4814	- 0,1316	
Absoluto	85 %	101,28 [kg/h]	24,46 [°C]	5,699
Escalonado	+ 1	- 0,4744	- 0,1089	

I . 4 . 3 . RESULTADOS DA ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DE PARÂMETROS

Realizados os ensaios em regime estacionário com alteração do valor da variável acima do valor de referência, foram obtidos os respectivos resultados do F.S., definido no item I.3.4., mostrados na tabela 11 .

Observa-se pelos resultados do F.S. que as variáveis de maior sensibilidade são : T_{ev} , T_{cond} , η_{comp} (como as principais) e T_{amb} , $\dot{m}_{\text{ref}}$ e $\phi_{\text{int-seg_desc}}$ (como secundárias), podendo-se desprezar a influência que as outras variáveis têm sobre o C.O.P., numa perturbação do valor de 25 % acima do valor de referência.

Uma vez quantificadas as sensibilidades das variáveis em estudo, propõe-se uma análise paramétrica que qualifica as variáveis já detectadas quanto ao grau de influência sobre o C.O.P. .

O conhecimento prévio da influência dos parâmetros operacionais sobre os valores da performance é de grande importância tanto para a melhoria do processo e sua otimização como para a definição das faixas adequadas de operação do sistema.

A verificação do grau de influência de uma variável ou seu fator de sensibilidade sobre o C.O.P. indica, com uma aproximação linear, a fragilidade do processo na alteração das diferentes variáveis.

A metodologia utilizada para a determinação do grau de influência de um parâmetro sobre as outras variáveis, como por exemplo sobre o C.O.P., é desenvolvida de forma quantitativa, através do F.S. (fator de sensibilidade), e de forma qualitativa, através da análise paramétrica do processo.

Tabela 11 . Resultados da análise de sensibilidade com o valor da variável superior à referência.

VARIÁVEL	VALOR DA VARIÁVEL			C.O.P.	F. S.
	REFERÊNCIA	Valor Absol.	% Acresc.		
$\dot{m}_{ref}$ [kg/h]	125	156,25	25,0	4,9443	-0,0177
$\dot{m}_{Eglic}$ [kg/h]	1000	1250	25,0	4,9663	0
$T_{eg\ in}$ [°C]	20	25	1,71**	4,9663	0**
T_{end} [°C]	35	43,75	2,84**	1,2273	-26,5141**
T_{ev} [°C]	0	5,0	1,83**	6,0062	11,44**
T_{amb} [°C]	25	31,25	2,10**	4,9569	-0,0918**
$U_{seg\ Eglic}$ [J/°C.s.m ²].10 ⁻³	1666,7	2083,4	25,0	4,9663	0
$\varepsilon_{seg\ Eglic}$. 10 ⁻³ [mm]	51,3	64,125	25,0	4,9663	0
$\phi_{INT-eg\ Eglic}$ [mm]	27	33,75	25,0	4,9663	0
$\phi_{INT-eg\ suc}$ [mm]	19	23,75	25,0	4,9690	0,0022
$U_{seg\ suc}$ [J/°C.s.m ²].10 ⁻³	1666,7	2083,4	25,0	4,9609	-0,0043
$\varepsilon_{seg\ suc}$. 10 ⁻⁵ [mm]	114	142,5	25,0	4,9662	-0,0001
$\phi_{INT-eg\ desc}$ [mm]	10,7	13,375	25,0	4,9869	0,0166
$U_{seg\ desc}$ [J/°C.s.m ²].10 ⁻³	2777,8	3472,3	25,0	4,9748	0,0068
$\varepsilon_{seg\ desc}$. 10 ⁻⁵ [mm]	64,2	80,25	25,0	4,9663	0
$L_{seg\ desc}$ [m]	1,0	1,25	25,0	4,9732	0,0056
$L_{seg\ liq}$ [m]	1,1	1,375	25,0	4,9679	0,0013
$L_{seg\ suc2}$ [m]	0,3	0,375	25,0	4,9660	-0,0002
$L_{seg\ suc1}$ [m]	1,5	1,875	25,0	4,9581	-0,0066
$L_{seg\ Eglic3}$ [m]	0,5	0,625	25,0	4,9663	0
$L_{seg\ Eglic1}$ [m]	4,5	5,625	25,0	4,9663	0
$L_{seg\ Eglic2}$ [m]	0,7	0,875	25,0	4,9663	0
η_{comp} [%]	75,0	93,75	25,0	6,2065	0,9989
UA_{cond} [J/°C.s.m ²]	555,5	694,4	25,0	4,9663	0
$UA_{sub-resf}$ [J/°C.s.m ²]	83,3	104,2	25,0	4,9704	0,0033
UA_{ev} [J/°C.s.m ²]	361,1	451,4	25,0	4,9663	0
ΔP_{tank} [Pa].10 ⁵	0,2	0,25	25,0	4,9663	0
ΔP_{ev} [Pa].10 ⁵	0,3	0,375	25,0	4,9663	0

** Calculado com referência a Temperatura em Kelvin.

I.4.4. ANÁLISE PARAMÉTRICA DO PROCESSO

A análise paramétrica mostra os efeitos sobre os valores do C.O.P. e sobre as variáveis dos processos sob diferentes perturbações dos parâmetros/variáveis de projeto ou operações.

Utilizando os valores de referência (valores do nível "0", tabela 2), os quais foram sugeridos pela bancada experimental, fez-se uma varredura dos valores de cada variável, individualmente, dentro da faixa estudada (entre os níveis "-" e "+"), avaliando-se o comportamento das outras variáveis não fixadas, e do C.O.P.. Estes efeitos percentuais das variáveis com relação a faixas de operação de um parâmetro estão mostrados nas figuras 34 a 57 do anexo VI.3.

Estas figuras mostram o grau de atenuação positiva ou negativa das outras variáveis e do C.O.P., quando apenas uma variável tende a uma alteração.

Uma vez que o C.O.P. é resultado da eficiência do processo e é calculado com os valores das variáveis alteradas como resultados das perturbações, então avaliou-se a grandeza da variação do C.O.P., através dos efeitos-resposta das variáveis.

A percentagem é dada em relação ao valor de referência de cada variável de processo, ou seja:

$$\frac{y - y^*}{y^*} \cdot 100 \quad (13)$$

onde "y" é o valor da variável na simulação e "y*" é o seu valor de referência.

É importante ressaltar que estas informações qualitativas e quantitativas são subsídios para um operador do sistema e também importantes para a programação lingüística do controle via lógica *nebulosa*.

Avaliando as figuras do anexo VI.3., que correspondem aos efeitos sobre as variáveis, quando efetuada uma varredura em outra, em estado estacionário, foram obtidos os seguintes resultados:

1) As varreduras, dentro da faixa de estudo proposta, dos parâmetros T_{amb} (figuras 40 a 42), UA_{ev} (figura 46), UA_{cond} (figura 45), $\dot{m}_{aglic}$ (figura 47), UA_{sub} (figuras 48 a 50) e L_{suc} (figuras 54 a 56) mostram pequenos efeitos nas outras variáveis do processo.

2) As varreduras dos parâmetros T_{ag-in} (figura 57), UA_{cond} (figura 45), mostram uma grande dependência da vazão de água com relação a temperatura de saída após o condensador.

3) Os efeitos das variáveis do processo frente a varredura das variáveis T_{ev} (figuras 47 a 49), η_{comp} (figuras 43 e 44) e T_{cond} (figuras 34 a 36) foram mais atenuados, mostrando suas

intensidades e tendências.

4) A varredura da variável $\dot{m}_{ref}$ também mostrou grande influência sobre as outras variáveis (figuras 51 a 53), embora não tenha acarretado uma mudança significativa no C.O.P. devido à estabilização do processo.

5) Estas figuras do anexo VI.3. confirmam qualitativamente os fatores de sensibilidade da tabela 6, complementando as informações sobre as outras variáveis quanto a suas variações.

Observa-se que a nomenclatura utilizada nas variáveis das figuras do anexo VI.3. é a mesma utilizada na figura 2 do esquema do processo.

I. 5 . VALIDAÇÃO DO MODELO PROPOSTO

O intuito da validação do modelo proposto ao circuito baseado na bancada experimental (TD-30) é adequar os parâmetros das operações unitárias aos parâmetros do protótipo com o objetivo de deixá-lo análogo.

O sistema de refrigeração experimental ensaiado se encontra instrumentado para medições de vazão volumétrica (água de resfriamento, do refrigerante líquido e da solução de etileno glicol), de pressão e temperaturas nas posições indicadas na figura 5 .

A potência do banco de resistência, a qual simula experimentalmente uma carga térmica, é calculada pela variação de entalpia da solução de etileno glicol :

$$q_o = \dot{m}_{Eglic} \cdot C_{pEglic} \cdot \Delta T = \dot{m}_{Eglic} \cdot C_{pEglic} \cdot (T6 - T7) \quad (14)$$

onde : $\rho_{Eglic} = 1060 \text{ kg / m}^3$, $C_{pEglic} = 3,516 \text{ kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C}$, T6 = a temperatura do etileno glicol na entrada do evaporador e T7 = temperatura do etileno glicol na saída do evaporador.

A validação do modelo proposto pelo software HYSIM, consiste na validação individual das operações unitárias e posteriormente do processo (conjunto das operações unitárias já validadas).

Os valores ajustados dos parâmetros de cada operação unitária são mostrados na tabela 12. E na tabela 13, são mostrados os valores das simulações do processo e experimentais dos dois ensaios realizados com os seus respectivos desvios.

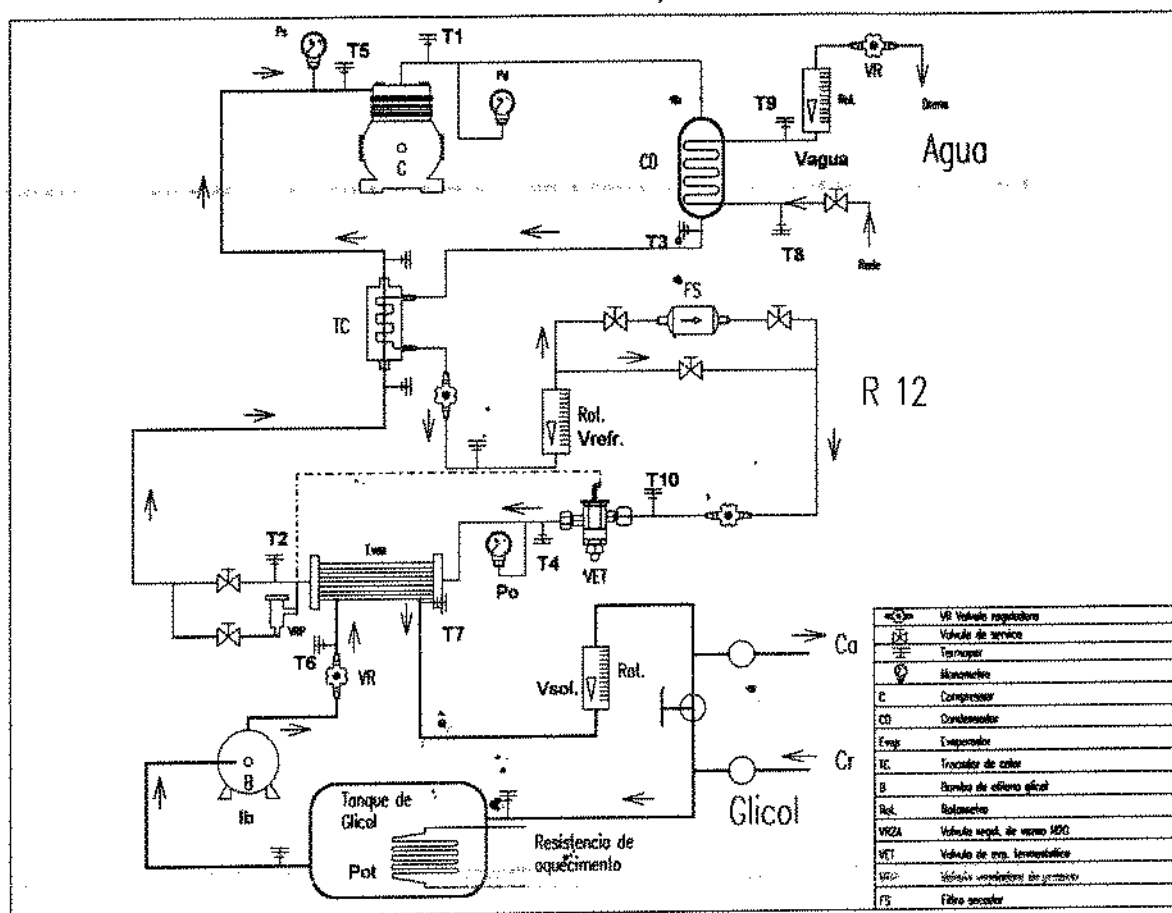


Figura 5 . Esquema do sistema de refrigeração para resfriamento de eglicol (bancada TD-30).

Tabela 12 . Valores médios dos parâmetros ajustados das operações unitárias.

OPERAÇÃO UNITÁRIA	PARÂMETRO	VALOR AJUSTADO		
		EXP 01	EXP 02	MEDIA
COMPRESSOR	η [%]	96,5	100,0	98,25
COMPRESSOR	q_{comp} [kJ/s]	2,172	2,048	2,110
CONDENSADOR	UA [kJ/°C.h]	0,582	0,581	0,581
EVAPORADOR	UA [kJ/°C.s]	1,294	1,462	1,378
SUB RESFRIADOR	UA [kJ/°C.s]	5,144	2,783	3,964
TANK	q_o [kJ/s]	5,367	6,337	5,852

* Aproximação atribuída de $\Delta P = 0$.

Tabela 13 . Comparação dos valores simulados do processo com os ensaios experimentais.

VARIÁVEL	ENSAIO Nº 01			ENSAIO Nº 02		
	VALORES		% ERRO	VALORES		% ERRO
	SIMULADO	EXPERI-MENTAL		SIMULADO	EXPERI-MENTAL	
T1	81,6 °C	81,9 °C	-0,1	80,4 °C*	80,4 °C	0
T2	16,2 °C	15,2 °C	+0,4	3,3 °C	6,8 °C	-1,3
T3	34,1 °C	32,2 °C	+0,6	34,0 °C	31,6 °C	+0,8
T4	-7,6 °C*	-7,6 °C	0	-9,0 °C*	-9,0 °C	0
T5	27,5 °C*	27,5 °C	0	25,0 °C*	25,0 °C	0
T6	18,0 °C	15,4 °C	+0,9	7,1 °C	5,5 °C	+0,6
T7	12,2 °C*	12,2 °C	0	2,1 °C*	2,1 °C	0
T8	26,1 °C*	26,1 °C	0	25,9 °C*	25,9 °C	0
T9	36,3 °C	30,9 °C	+1,8	35,7 °C	30,8 °C	+1,6
T10	33,7 °C	31,1 °C	+0,9	33,6 °C	30,7 °C	+1,0
V _{Elic.}	1,62 m ³ /h *	1,62 m ³ /h	0	1,8 m ³ /h *	1,8 m ³ /h	0
V _{refr.}	0,2016 m ³ /h*	0,2016 m ³ /h	0	0,2016 m ³ /h*	0,2016 m ³ /h	0
V _{ag.}	1,044 m ³ /h*	1,044 m ³ /h	0	1,08 m ³ /h *	1,08 m ³ /h	0
P _{suc}	2,096 kPa*	2,096 kPa *	0	2,165 kPa *	2,165 kPa	0
P _o	2,382 kPa	2,303 kPa	+3,5	2,2677 kPa	2,303 kPa	+1,5
P _{desc}	7,918 kPa	8,163 kPa	-3,0	8,69544 kPa	8,163 kPa	+6,5
Q _{comp}	2,172 kJ/s	2,172 kJ/s	0	2,171 kJ/s	2,048 kJ/s	+6,0
Q _o	9,728 kJ/s	5,367 kJ/s	+81,2	9,319 kJ/s	6,337 kJ/s	+47,0

* Valor imposto na simulação.

Obs. : % erro calculado para temperaturas em Kelvin.

Os erros percentuais com relação ao experimental foram pequenos com exceção da variável q_o (carga térmica). Considerando-se que os valores experimentais possuam erros de medida tanto para as vazões quanto para as temperaturas, então pode-se atribuir a maior diferença do valor experimental para o simulado da carga térmica devido à contribuição dos erros destas medidas envolvidas neste cálculo.

As precisões de leitura são : para as vazões : $\pm 0,018 \text{ m}^3/\text{h}$ para as vazões de água e etileno-glicol e $\pm 0,0018 \text{ m}^3/\text{h}$ para a vazão de refrigerante, e para temperaturas : $\pm 0,5 \text{ }^\circ\text{C}$.

O exemplo do ensaio 01 em que se obteve uma diferença de 2,6 °C entre o o ensaio experimental e o simulado, gerou um erro na carga térmica de + 81,2 % . Este erro na leitura pode ser justificado pela instabilidade nos indicadores destas variáveis nos pontos de medida, onde é dado pela contribuição dos erros da vazão do fluido e das temperaturas envolvidas neste cálculo.

1.6. CONCLUSÕES

Do estudo de otimização do sistema de refrigeração de simples estágio para resfriamento de líquido concluiu-se que :

1) É possível simular sistemas de refrigeração, com o software HYSIM. Os maiores erros obtidos na validação do modelo simulado são resultantes de imprecisões das medidas no sistema experimental, o que viabiliza a utilização deste software comercial nas avaliações de comportamento do processo modelado em regime estacionário.

2) Três variáveis [temperatura de evaporação (T_{ev}), temperatura de condensação (T_{cond}) e eficiência do compressor (η_{comp})] são as que mais afetam o C.O.P. de um sistema de refrigeração de parâmetros de dimensionamento não fixados e com regime de operação variável, segundo os métodos de Plackett-Burman e o de Planejamento Experimental, dentro da faixa avaliada.

3) Três variáveis [vazão mássica de refrigerante ($\dot{m}_{ref}$), temperatura ambiente (T_{amb}) e eficiência do compressor (η_{comp})] são as que mais afetam o C.O.P. de um sistema de refrigeração com parâmetros de dimensionamento definidos e com regime de operação fixo, segundo os métodos de Plackett-Burman e o de Planejamento Experimental, dentro da faixa avaliada.

4) Os graus de influência de algumas variáveis sobre o C.O.P. (ou seja, a fragilidade do processo), quantificados pelo fator de sensibilidade são explicadas abaixo :

4.1.) O fator de sensibilidade da T_{cond} é de -26,51 , o que significa que um acréscimo de 1 % da temperatura absoluta de condensação acarreta uma redução de 26,51 % no C.O.P. , considerando as outras variáveis fixas nos valores de referência.

4.2.) O fator de sensibilidade da T_{ev} é de + 11,44 , significando que um acréscimo de 1,0 % da temperatura absoluta de evaporação acarreta um incremento de 11,44 % no C.O.P., considerando as outras variáveis fixas nos valores de referência.

4.3.) O fator de sensibilidade da η_{comp} é de + 0,99 , sendo que um acréscimo de 1,0 % no valor da eficiência do compressor acarreta um incremento de + 0,99 % no C.O.P. , considerando as outras variáveis fixas nos valores de referência .

4.4.) O fator de sensibilidade da T_{amb} é de - 0,0918 , significando que um acréscimo de 1,0 % da temperatura absoluta ambiente acarreta um decréscimo de 0,0918 % no C.O.P. , considerando as outras variáveis fixas nos valores de referência.

4.5.) O fator de sensibilidade da $\dot{m}_{ref}$ é de - 0,0177 , sendo que um acréscimo de 1,0 % no valor da vazão mássica do refrigerante acarreta um decréscimo de 0,0177 % no C.O.P. , considerando as outras variáveis fixas nos valores de referência.

5) Os valores ótimos das variáveis avaliadas dentro da faixa estudada para obtenção do C.O.P. máximo no sistema de refrigeração não dimensionado e com regime de operação variável são: $T_{ev} = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_{cond} = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $\eta_{comp} = 85\%$, segundo análise de superfície de resposta, evidenciando o esperado. Observa-se que estes valores são os extremos da faixa estudada deste processo com uma global abrangência das possíveis variáveis.

6) Os valores ótimos das variáveis avaliadas para obtenção do C.O.P. máximo no sistema de refrigeração definido e com regime de operação fixo dentro da faixa estudada são : $T_{amb} = 24,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $\dot{m}_{ref} = 101,1\text{ kg/h}$, segundo análise algébrica da função objetivo.

7) Os parâmetros de dimensionamento dos equipamentos (de projeto) de um sistema de refrigeração não afetam significativamente a variação do C.O.P., dentro da faixa estudada, o que comprova a não interferência fluido-dinâmica, tanto nas tubulações quanto nos equipamentos, viabilizando uma simplificação do modelamento matemático do processo dinâmico.

8) O estudo de otimização de um processo específico de refrigeração respaldado apenas na “primeira lei da termodinâmica” (balanços de energia), mostrou-se conclusivo dentro da faixa selecionada de valores das variáveis, embora o estudo da irreversibilidade deste ou de outros processos produziria maiores informações convenientes à otimização.

9) As informações obtidas pelos fator de sensibilidade e as tendências da variável-resposta quando perturbada por uma variável do processo, caracterizam o seu comportamento e auxiliam a montagem da base de conhecimento do controlador via lógica *nebulosa*.

CAPÍTULO II : MODELAGEM E SIMULAÇÃO DINÂMICA

II.1. INTRODUÇÃO

A racionalização de consumo de energia em sistema de refrigeração vem sendo proposta por diversos autores [VARGAS & PARISE (1992), GREEN et alii (1980)] em diferentes tipos de aplicações e formas de controle.

GREEN et alii (1980) mostraram que uma bomba de calor operando com um compressor de rotação variável, uma válvula de expansão eletricamente operada e taxas variáveis de massa de ar nos trocadores de calor é mais eficiente que o sistema convencional "on-off".

VARGAS & PARISE (1992) obtiveram, através de simulação, uma economia de 9 % no consumo de energia em bomba de calor de rotação variável, utilizando controle em malha fechada de um servomotor e de um sensor de temperatura, em relação ao consumo quando usado o controle convencional "on-off" sob as mesmas condições de operação.

MARSHALL & JAMES (1975) modelaram uma planta de congelamento e o sistema de refrigeração com um alto nível de detalhamento e obtiveram valores das variáveis com boa aproximação ao processo experimental em função das hipóteses utilizadas. Uma vez que as hipóteses utilizadas pelos autores foram satisfatórias, aplicou-as no modelo matemático desenvolvido, apresentado a seguir.

O estudo de automação de um sistema de refrigeração poderia ser realizado com diferentes lógicas de controle, como por exemplo PID, P, adaptativo e "fuzzy". Entretanto selecionou-se apenas a lógica nebulosa, a fim de analisar a melhoria da eficiência deste processo com uma das possíveis formas de controle como tentativa de atualizar os controles eletro-mecânicos (que ajustam em patamares ou no máximo com lógica proporcional) como por exemplo o controle on-off para processos de pequeno porte.

II. 2 . METODOLOGIA

II. 2 . 1 . MODELAGEM DE UM SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO PARA RESFRIAMENTO DE LÍQUIDO.

Tendo em vista a dificuldade de automatizar com qualquer lógica de controle no protótipo experimental, iniciaram-se estudos através de simulações, a fim de obter subsídios para implementação da lógica nebulosa.

Assim propôs-se a modelagem de um sistema dinâmico de refrigeração para resfriamento de líquido baseado numa bancada experimental, capacitando-o em diferentes lógicas de controle, como por exemplo a *fuzzy logic*.

O processo a ser modelado refere-se a um sistema de refrigeração de simples estágio para resfriamento de solução de etileno glicol / água, em regime transiente, com R-12, mostrado na figura 6.

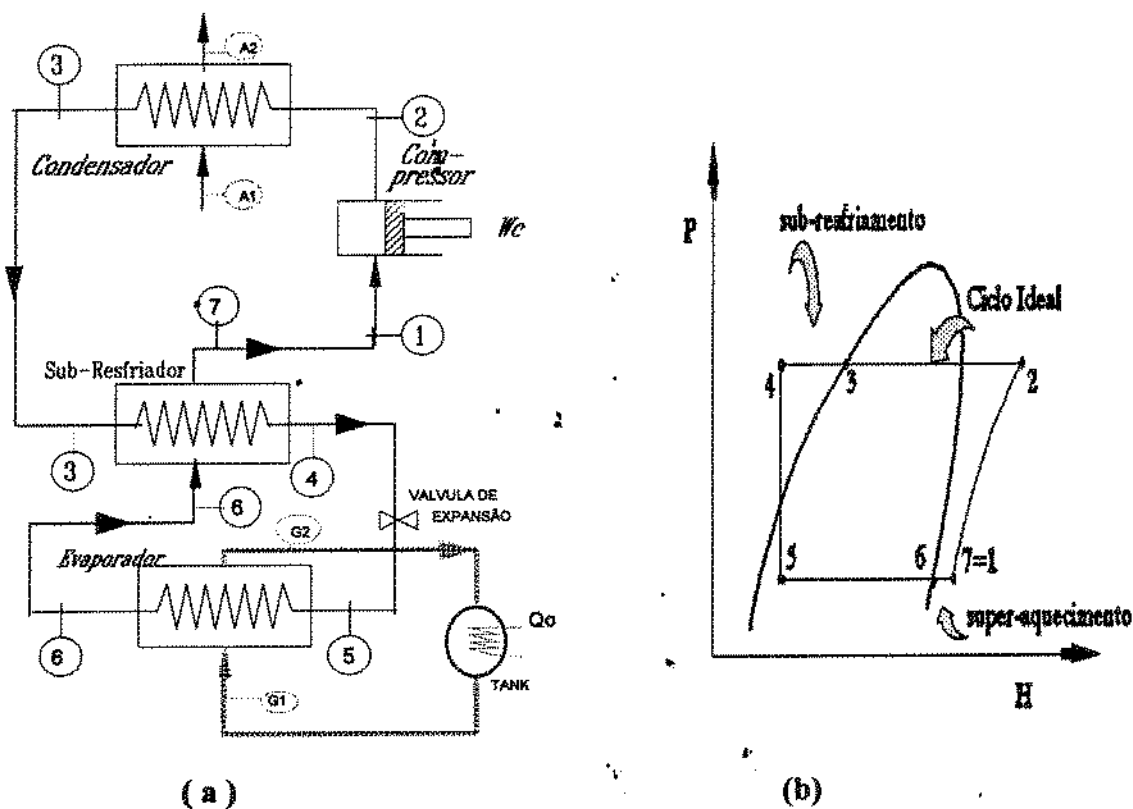


Figura 6 . a) Sistema de refrigeração de simples estágio para resfriamento de líquido; b) Representação do ciclo real no diagrama $P \times h$.

II.2.2. MODELO MATEMÁTICO DE UM SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO PARA RESFRIAMENTO DE LÍQUIDO

O modelo matemático deste processo é constituído de um conjunto de quatorze equações diferenciais ordinárias e vinte e três algébricas, incluindo equações de estado do refrigerante, que descrevem os balanços de massa e energia sem a influência fluido-dinâmica (perda de pressão) em todas as operações unitárias do sistema (nas tubulações e nos equipamentos).

As equações diferenciais foram propostas a partir de balanços de matéria e energia para cada operação unitária (volume de controle), a fim de obter os valores das respectivas variáveis em regime transiente.

Por hipótese geral, foi admitido em todos os volumes de controle sem a variação de matéria com o tempo, ou seja, sem acumulação de massa do fluido analisado.

Como visto no capítulo anterior, o C.O.P. do sistema de refrigeração não é afetado pelas influências fluido-dinâmicas, o que vale considerá-las neutras neste modelo proposto. Outras informações das simulações pelo HYSIM, tais como tendências das variáveis e o fator de sensibilidade foram utilizadas no desenvolvimento nesta etapa do trabalho.

O balanço de energia avalia o montante de taxa de energia conduzida pelas linhas de correntes, tanto na entrada como na saída dos volumes de controle, cuja diferença destas energias resulta na acumulação de energia no tempo. A energia contida no volume de controle pode ser expressada com relação a temperatura ($M \cdot c \cdot T$) ou com relação a entalpia específica ($M \cdot h$), uma vez que esta última é uma grandeza derivada que contempla outras ($dh = du + dP.v$).

É sabido que, para líquidos, a relação $(\partial v / \partial T)_P$ é relativamente pequena e portanto é pequena a diferença entre os calores específicos à pressão constante e volume constante, ou seja, $c_p = c_v$. Assim, como as hipóteses para o modelo não consideram variação de pressão no interior dos volumes de controle, então utilizar-se-á apenas o termo " c_p ".

Algumas correlações polinomiais para a predição das propriedades termodinâmicas de diferentes refrigerantes, utilizadas no modelo matemático, foram compiladas do trabalho de CLELAND (1986), as quais usam os coeficientes "ai", mostrados na tabela 14 para o R-12.

No desenvolvimento das equações diferenciais ordinárias de cada volume de controle, foi admitido uma aproximação específica, também utilizada por MARSHAL & JAMES (1975), de que a variável dependente do tempo pode ser tanto a de entrada como a de saída do volume de controle, a fim de obter quantidades iguais de variáveis e de equações no sistema matemático. Esta aproximação

diverge da hipótese das condições médias dentro do volume de controle, entretanto, como o tempo de integração é infinitamente pequeno, então as condições médias se aproximariam da opção selecionada. Contudo esta consideração foi acatada para viabilizar a solução matemática.

MARSHAL E & JAMES (1975) salientam que as hipóteses de aproximação utilizadas em seu modelo matemático obtiveram resultados próximos a uma planta experimental. Em virtude deste resultado, foram utilizadas todas as hipóteses que estes autores já usaram com sucesso.

Cada um dos volumes de controle é descrito a seguir com suas respectivas hipóteses, dentre as quais são :

- * não há acumulação de massa dos fluidos com o tempo nos volumes de controles;
- * compressão isoentrópica e adiabática;
- * tratamento de cada operação unitária como elemento único;
- * homogeneidade instantânea das propriedades dos fluidos nos volumes de controles

Assim o equacionamento resultante do modelo matemático é especificado a seguir para cada volume de controle e seu respectivo fluido :

A) Reservatório de aquecimento da solução de etileno glicol [TANK] :

$$\frac{dT_{G1}}{dt} = \frac{1}{M_{Eglic_TANK} \cdot Cp_{Eglic}} \left[q_0 + \dot{m}_{Eglic} \cdot Cp_{Eglic} \cdot (T_{G2} - T_{G1}) \right] \quad (15)$$

$$\dot{m}_{G2} - \dot{m}_{G1} = \frac{d}{dt} (M_{Eglic})_{TANK} = 0 \quad (16)$$

Hipóteses:

Carga térmica (q_0) fixada no reservatório de aquecimento do etileno glicol [TANK], simulando diversas formas de trocas de calor.

B) Evaporador :

B.1.) Lado Etileno Glicol :

$$\frac{dT_{G2}}{dt} = \frac{1}{M_{Eglic_ev} \cdot Cp_{Eglic}} \left[-q_{ev} + \dot{m}_{Eglic} \cdot Cp_{Eglic} \cdot (T_{G1} - T_{G2}) \right] \quad (17)$$

$$\dot{m}_{G2} - \dot{m}_{G1} = \frac{d}{dt} (M_{\text{Régio}})_{\text{TANK}} = 0 \quad (18)$$

Hipótese :

Troca de calor apenas com o refrigerante no interior do evaporador.

B.2.) Lado do Refrigerante :

$$\frac{dh_6}{dt} = \frac{1}{\rho_6 \cdot V_{ev}} \left[q_{ev} + \dot{m}_{ref} (h_5 - h_6) \right] \quad (19)$$

$$\dot{m}_5 - \dot{m}_6 = \frac{d}{dt} (M_{ref, ev}) = 0 \quad (20)$$

Hipóteses :

#Variações lineares da entalpia e o título do refrigerante da entrada até a saída, segundo proposição de RAJENDRAN & PATE (1986);

Título médio do refrigerante interno ao evaporador invariante no tempo, segundo MARSHAL E & JAMES (1975).

B.3.) Calor trocado no evaporador :

$$q_{ev} = [U.A]_{ev} \cdot DTML_{ev} \quad (21)$$

onde:

$$DTML_{ev} = \frac{(T_{G1} - T_{G2})}{\ln \left(\frac{T_{G1} - T_{ev}}{T_{G2} - T_{ev}} \right)} \quad (22)$$

sendo "U" o coeficiente global de transferência de calor e "A" a área de troca de calor e $f=1$, fator de correção do $DTML_{ev}$, uma vez que o trocador de calor é um evaporador para substância pura.

C) Condensador :

C.1.) Lado da água de resfriamento :

$$\frac{dT_{A2}}{dt} = \frac{1}{M_{Ag_cond} \cdot Cp_{ag}} \left[q_{cond} + \dot{m}_{Ag} \cdot Cp_{Ag} \cdot (T_{A1} - T_{A2}) \right] \quad (23)$$

$$\dot{m}_{A1} - \dot{m}_{A2} = \frac{d}{dt} (M_{Ag})_{COND} = 0 \quad (24)$$

Hipótese :

Temperatura da água de entrada invariante no intervalo de tempo.

C.2.) Lado do refrigerante :

$$\frac{dh_3}{dt} = \frac{1}{\rho_3 \cdot V_{cond}} \left[-q_{cond} + \dot{m}_{ref} \cdot (h_2 - h_3) \right] \quad (25)$$

$$\dot{m}_2 - \dot{m}_3 = \frac{d}{dt} (M_{ref})_{COND} = 0 \quad (26)$$

Hipóteses :

#Variações lineares da entalpia e o título do refrigerante da entrada até a saída, segundo proposição de RAJENDRAN & PATE (1986);

Título médio do refrigerante interno ao evaporador invariante no tempo, segundo MARSHAL E & JAMES (1975).

C.3.) Calor trocado no condensador :

$$q_{cond} = [U \cdot A]_{cond} \cdot DTML_{cond} \quad (27)$$

onde :

$$DTML_{cond} = \frac{(T_2 - T_{A1}) - (T_3 - T_{A2})}{\ln \frac{(T_2 - T_{A1})}{(T_3 - T_{A2})}} \quad (28)$$

sendo e $f=1$, fator de correção do $DTML_{cond}$, uma vez que o trocador de calor é um evaporador para substância pura.

D) Compressor :

$$\Delta h_{comp} = h_2 - h_1 = \frac{c}{c-1} \cdot p_1 \cdot v_1 \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{c-1}{c}} - 1 \right] \quad (29)$$

onde Δh_{comp} é a energia útil específica transferida à substância na condição “1”, podendo estar como vapor saturado ou super-aquecido na pressão “ p_1 ” e volume específico “ v_1 ”. Dependendo do estado do vapor de sucção, CLELAND (1986) sugere uma adequação ao coeficiente de ajuste “c”, considerando a razão de compressão (p_2 / p_1) pelas seguintes correlações polinomiais :

a) Para vapor saturado:

$$c = c_{il} \quad (30)$$

onde:

$$c_{il} = a_{31} + a_{32} \cdot (T_{sat1}) + a_{33} \cdot (T_{sat1})^2 + a_{34} \cdot (T_{sat1}) \cdot \Delta T_c + a_{35} \cdot (T_{sat1})^2 \cdot \Delta T_c + a_{36} \cdot (T_{sat1}) \cdot (\Delta T_c)^2 + a_{37} \cdot (T_{sat1})^2 \cdot \Delta T_c + a_{38} \cdot \Delta T_c \quad (31)$$

sendo :

$$\Delta T_c = T_{sat2} - T_{sat1} \quad (32)$$

b) Para vapor superaquecido:

$$c = c_{il} \cdot [1 + a_{39} \cdot \Delta T_s + a_{40} \cdot (\Delta T_s)^2 + a_{41} \cdot (\Delta T_s) \cdot T_{sat1} + a_{42} \cdot (\Delta T_s)^2 \cdot (T_{sat1})] \quad (33)$$

onde :

$$\Delta T_s = T_1 - T_{sat1} \quad (34)$$

Hipótese :

Troca de calor desprezível através das paredes do cilindro;

E) Balanço de energia global :

$$q_{\text{comp}} = q_{\text{cond}} - q_{\text{ev}} = \Delta h_{\text{comp}} \quad (35)$$

Hipótese : # Trocas de calor apenas no condensador e evaporador.

F) Válvula de expansão :

$$h_4 = h_5 \quad (36)$$

Hipóteses : # Processo isoentálpico.

G) Sub-resfriador :

G.1.) Linha do refrigerante líquido :

$$\frac{dT_4}{dt} = \frac{1}{M_{\text{ref_liq_sub}} \cdot C_{p_{\text{ref_liq_sub}}}} \left[-q_{\text{sub}} + \dot{m}_{\text{ref}} \cdot C_{p_{\text{ref_liq}}} (T_3 - T_4) \right] \quad (37)$$

$$\dot{m}_3 - \dot{m}_4 = \frac{d}{dt} (M_{\text{ref_liq}})_{\text{SUB}} = 0 \quad (38)$$

G.2.) Linha do refrigerante vapor :

$$\frac{dh_1}{dt} = \frac{1}{\rho_1 \cdot V_{\text{vap_sub}}} \left[q_{\text{sub}} + \dot{m}_{\text{ref}} (h_6 - h_1) \right] \quad (39)$$

$$\dot{m}_6 - \dot{m}_1 = \frac{d}{dt} (M_{\text{ref_vap}})_{\text{SUB}} = 0 \quad (40)$$

Hipótese :

linha de sucção com troca de calor desprezível.

G.3.) Calor trocado no sub-resfriador :

$$q_{\text{sub}} = [U \cdot A]_{\text{sub}} \cdot \text{DTML}_{\text{sub}} \quad (41)$$

onde :

$$DTML_{sub} = \frac{(T_3 - T_1) - (T_4 - T_6)}{\ln \frac{(T_3 - T_1)}{(T_4 - T_6)}} \quad (42)$$

Hipóteses :

Troca de calor apenas com o refrigerante.

II. 2 . 2 . 1 . CORRELAÇÕES DE ESTADO PARA AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES TERMODINÂMICAS DE REFRIGERANTE

CLELAND (1986) propôs as seguintes correlações polinomiais para avaliação das propriedades termodinâmicas de refrigerante (R-12) dentro de faixas limitadas de aplicabilidade:

A) CONDIÇÕES DE SATURAÇÃO :

$$P_{sat} = \exp[a_1 + a_2 / (T_{sat} + a_3)] \quad (43)$$

$$T_{sat} = a_2 / [\ln(P_{sat}) - a_1] - a_3 \quad (44)$$

faixa de aplicabilidade : - 60 °C < Tsat < + 60 °C

unidades : [P] = Pa e [T] = °C

B) ENTALPIA :

B.1.) Entalpia do líquido sub-resfriado:

$$h_{liq} = a_4 + a_5 \cdot T_{liq} + a_6 \cdot (T_{liq})^2 + a_7 \cdot (T_{liq})^3 \quad (45)$$

sendo que $\Delta T_{sub} > 0$, onde :

$$\Delta T_{\text{sub}} = T_{\text{sat}} - T_{\text{liq}} \quad (46)$$

unidades : [h] = J/kg e a_4 está no padrão ASHRAE ($h_{\text{liq}} = 200 \text{ J/kg à } 0^\circ \text{C}$)

B.2.) Entalpia do vapor saturado:

$$h_v = h_{11} + a_{12} \quad (47)$$

sendo $a_{12} = 0$ para o R-12 e :

$$h_{11} = a_8 + a_9 \cdot T_{\text{sat}} + a_{10} \cdot (T_{\text{sat}})^2 + a_{11} \cdot (T_{\text{sat}})^3 \quad (48)$$

B.3.) Entalpia do vapor superaquecido :

$$h_{vs} = h_{12} + a_{12} \quad (49)$$

onde :

$$h_{12} = h_{11} \cdot \left[1 + a_{13} \cdot \Delta T_s + a_{14} \cdot (\Delta T_s)^2 + a_{15} \cdot \Delta T_s \cdot T_{\text{sat}} + a_{16} \cdot (\Delta T_s)^2 \cdot T_{\text{sat}} + a_{17} \cdot \Delta T_s \cdot (T_{\text{sat}})^2 + a_{18} \cdot (\Delta T_s)^2 \cdot (T_{\text{sat}})^2 \right] \quad (50)$$

sendo que o superaquecimento é dado por : $\Delta T_s = T_s - T_{\text{sat}}$

C) VOLUME ESPECÍFICO :

C.1.) Volume específico do vapor saturado :

$$v_{\text{vsat}} = \exp \left[a_{19} + a_{20} / (T_{\text{sat}} + 273,15) \right] \cdot \left(a_{21} + a_{22} \cdot T_{\text{sat}} + a_{23} \cdot (T_{\text{sat}})^2 + a_{24} \cdot (T_{\text{sat}})^3 \right) \quad (51)$$

unidades : [v] = m³/kg

C.2.) Volume específico do vapor superaquecido :

$$v_{vs} = v_{vsat} \cdot \left[1 + a_{25} \cdot \Delta T_s + a_{26} \cdot (\Delta T_s)^2 + a_{27} \cdot \Delta T_s \cdot T_{sat} + a_{28} \cdot (\Delta T_s)^2 \cdot T_{sat} + a_{29} \cdot \Delta T_s \cdot (T_{sat})^2 + a_{30} \cdot (\Delta T_s)^2 \cdot (T_{sat})^2 \right] \quad (52)$$

C.3.) Volume específico do líquido :

$$v_{liq} = 0,71588 + 0,001493 \cdot T + 0,000015 \cdot T^2 \quad (53)$$

onde : $[v_{liq}] = l/kg$; $[T] = ^\circ C$

D) CALOR ESPECÍFICO DO LÍQUIDO : (BARCELLOS, 1990)

D.1.) Do líquido :

$$c_{liq} = 5,3 \cdot 10^{-2} \cdot T^2 + 1,485 \cdot T + 934,225 \quad (54)$$

onde : $[c_{liq}] = J/kg \ ^\circ C$, $[T] = ^\circ C$

D.2.) Do vapor superaquecido :

$$c_{sv} = 308 + (T + 273,16) + P \cdot \left(\frac{46,841}{(T + 273,16)^2} \right) \quad (55)$$

onde : $[P] = bar$; $[T] = ^\circ C$; $[c_{sv}] = J/kg \ ^\circ C$

Tabela 14 . Valores dos coeficientes das correlações de estado para R-12.

a ₁	a ₂	a ₃	a ₄	a ₅	a ₆
20,82963	-2033,5646	248,30	36006	923,88	0,83716
a ₇ x 10 ⁻³	a ₈	a ₉	a ₁₀	a ₁₁ x 10 ⁻³	a ₁₂
5,3772	187565	428,992	-0,75152	-5,6695	0,0
a ₁₃ x 10 ⁻³	a ₁₄ x 10 ⁻⁷	a ₁₅ x 10 ⁻⁶	a ₁₆ x 10 ⁻⁸	a ₁₇ x 10 ⁻⁸	a ₁₈ x 10 ⁻¹⁰
3,43263	7,27473	7,27759	-6,6365	6,95693	-4,17264
a ₁₉	a ₂₀	a ₂₁	a ₂₂ x 10 ⁻⁴	a ₂₃ x 10 ⁻⁶	a ₂₄ x 10 ⁻⁷
-11,58643	2372,495	1,00755	4,94025	-6,04777	-2,29472
a ₂₅ x 10 ⁻³	a ₂₆ x 10 ⁻⁶	a ₂₇ x 10 ⁻⁵	a ₂₈ x 10 ⁻⁷	a ₂₉ x 10 ⁻⁷	a ₃₀ x 10 ⁻⁹
4,99659	-5,11093	2,04917	-1,5197	3,64536	-1,67593
a ₃₁	a ₃₂ x 10 ⁻³	a ₃₃ x 10 ⁻⁶	a ₃₄ x 10 ⁻⁶	a ₃₅ x 10 ⁻⁷	a ₃₆ x 10 ⁻⁸
1,086089	-1,81486	-14,8704	-2,20685	1,97069	-7,86500
a ₃₇ x 10 ⁻⁹	a ₃₈ x 10 ⁻⁴	a ₃₉ x 10 ⁻⁴	a ₄₀ x 10 ⁻⁶	a ₄₁ x 10 ⁻⁵	a ₄₂ x 10 ⁻⁷
-1,96889	-5,62656	7,29893	-8,58521	1,89573	-1,77018

II. 2 . 3 . SIMULAÇÃO DE SISTEMAS FRIGORÍFICOS

A partir do modelo matemático do processo de resfriamento de etileno glicol com um sistema de refrigeração de simples estágio foi necessário desenvolver um software para simulação que possibilitasse alterar as condições de operações das variáveis e com apresentação gráfica do comportamento dinâmico do sistema. Foram utilizadas rotinas para solução numérica das equações diferenciais ordinárias do modelo, possibilitando alterações das propriedades termodinâmicas refrigerante R-12 através de correlações .

II. 2 . 3 . 1 . DESENVOLVIMENTO DO PROGRAMA DE SIMULAÇÃO DO MODELO

O software desenvolvido para a simulação em estado dinâmico do modelo proposto seguiu o diagrama de blocos simplificado, mostrado na figura 7 .

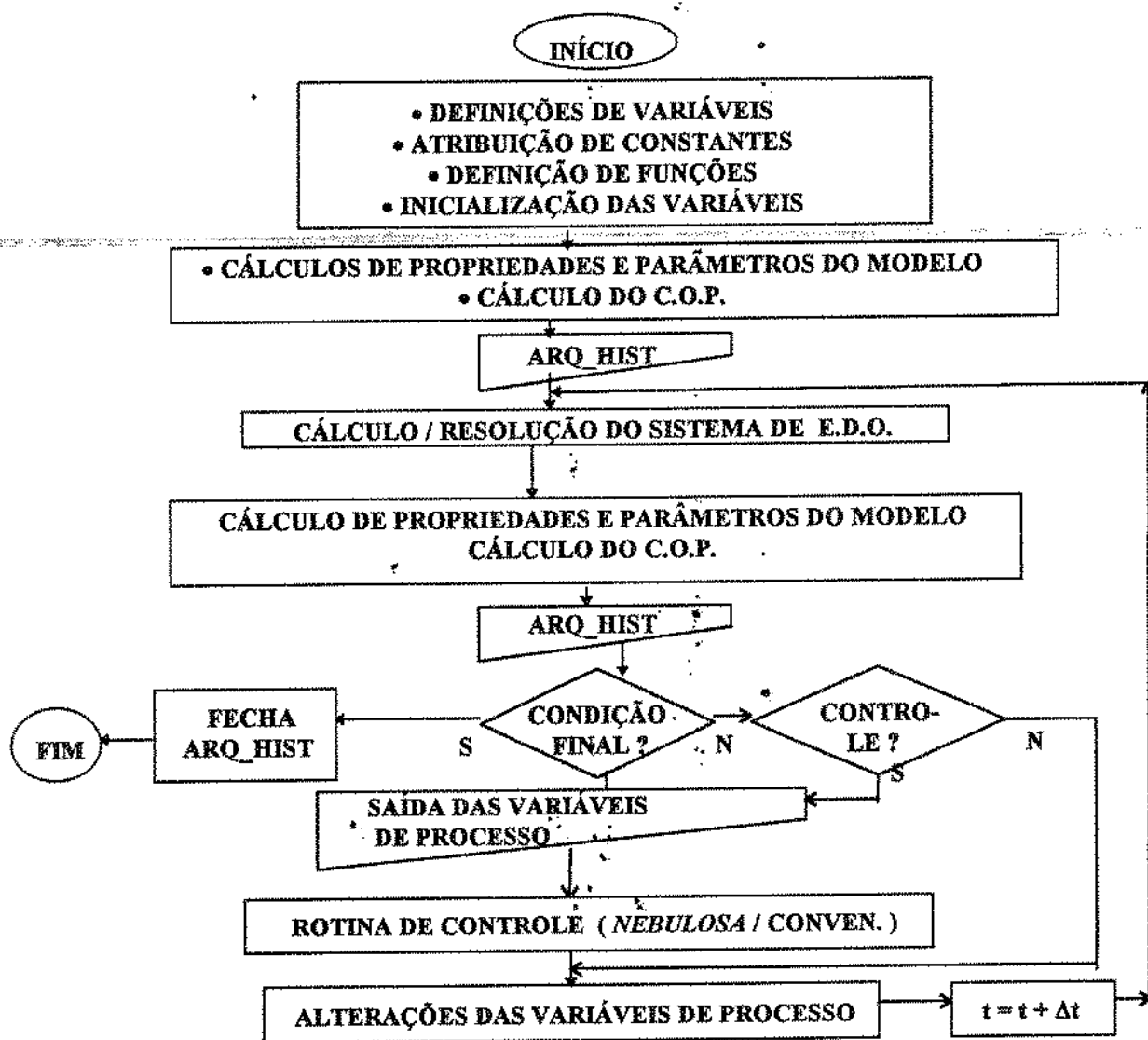


Figura 7 . Diagrama de Blocos Simplificado do programa de simulação.

Este programa foi desenvolvido para substituir um protótipo experimental, devido a dificuldade de sua obtenção e implementação. A sistemática de iteração entre o processo e o controle é similar, tanto no experimental como no processo simulado, conforme mostrado na figura 8 .

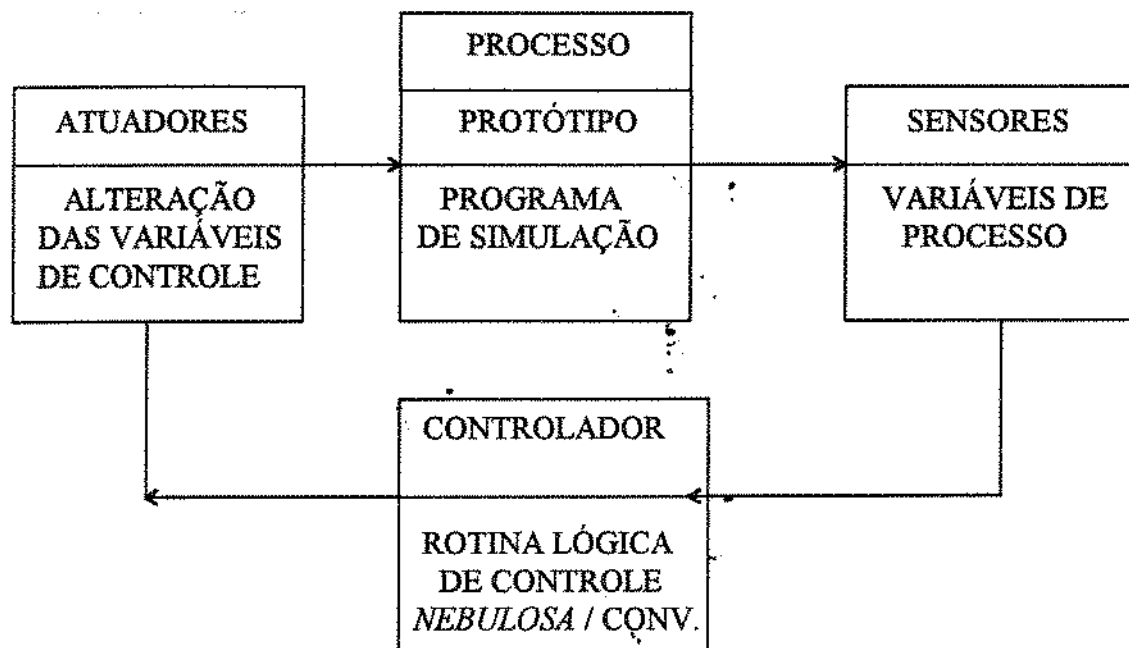


Figura 8 : Esquema da relação de processo com o controle.

As características gerais deste software são as seguintes :

- Resolução das equações do modelo específico;
- Armazenamento de dados em arquivo;
- Opção de controles (*Nebuloso* / convencional)
- Opção de com / sem controle ;
- Incorporação de perturbações externas (degrau / função senoidal);
- Comunicação com rotinas de controle .

Uma das lógicas de controle utilizadas é fornecida pela rotina de controle *nebuloso* produzida pela H.I. Tecnologia, a qual permite a seleção de variáveis de controle e de processo e a criação das regras linguísticas.

$$\dot{y}_{j1} = y_{j1} + 0,5.h.k_{j1} \quad (62)$$

$$\dot{\bar{y}}_{j1} = y_{j1} + c.h.k_{j1} + a.h.k_{j2} \quad (63)$$

$$\dot{\bar{\bar{y}}}_{j1} = y_{j1} - \frac{h}{\sqrt{2}}.k_{j2} + b.h.k_{j3} \quad (64)$$

"h" é o incremento de tempo e y_i os valores das variáveis no tempo t_i .

As condições iniciais utilizadas para a solução do sistema E.D.O. são dados de entrada aleatórios que o próprio usuário impõe, respeitando algumas restrições para que não haja "erro de domínio" nas equações que utilizam logaritmo neperiano.

II.3. MATERIAL

Os equipamentos e softwares utilizados na simulação do modelo matemático do processo de resfriamento de líquido com sistema de refrigeração foi :

Microcomputador 486 DX , 66 MHz.

Linguagem de Programação "C".

Programa de Simulação dinâmico do modelo do processo.

Planilha eletrônica - Excel 4.0 .

II.3.1. DESCRIÇÃO DO SIMULADOR DINÂMICO

O programa de simulação dinâmica do processo de resfriamento de líquido com um sistema de refrigeração de simples estágio foi desenvolvido em linguagem "C" , semelhante ao ambiente *Windows*.

O programa desenvolvido possui as seguintes funções : (Configuração de processamento; Execução do processo; Comunicação com rotinas ou *hardware* de controle; Supervisor de processo).

O usuário deste software tem a facilidade de operação através de 'telas' , 'janelas' e 'botões' selecionados pelo mouse, descritos no anexo VI.11.

O programa desenvolvido, no formato executável (CHILLER.EXE) encontra-se no anexo VI.11.3. como um produto desta pesquisa.

II. 4 . RESULTADOS E ANÁLISES

A partir do programa de simulação dinâmica do processo desenvolvido foi possível obter os resultados das variáveis e avaliar o comportamento dinâmico após o tratamento dos dados.

Baseado na bancada experimental (TD-30), estimou-se os seguintes parâmetros físicos das operações unitárias:

[U.A] _{EV}	= 319,4 J/°C.s	V _{SUB_RESF_REF_LIQ.}	= 0,15 dm ³
[U.A] _{COND}	= 277,8 J/°C.s	V _{SUB_RESF_REF_VAP.}	= 1,5 dm ³
[U.A] _{SUB_RESF}	= 36,1 J/°C.s	V _{COND_AG.}	= 3,0 dm ³
V _{COND_REF.}	= 2 dm ³	V _{EV_REF.}	= 1,2 dm ³
V _{TANK}	= 10 dm ³	V _{EV_EGLIC.}	= 2,0 dm ³

As análises do processo modelado e do seu comportamento necessitam de resultados que estão discriminados nos seguintes itens :

A) Convergência do modelo.

A partir da mesma condição inicial, foram testados diferentes valores do incremento de tempo, a fim de verificar a convergência do valor de uma mesma variável.

Considerando que os valores de referência para convergência sejam os valores das variáveis obtidas com incremento de tempo infinitamente pequeno ($\Delta t = 0,005\text{ s}$), dados na tabela 15, comparou-se os valores das variáveis num mesmo tempo de execução com os valores das variáveis obtidas com incrementos de tempo diferentes, conforme mostrado nas figuras 58 a 63 do anexo VI.4.1.

Tabela 15 . Condição inicial aleatória e valores das variáveis em diferentes tempos de simulação com incrementos de tempo de $\Delta t = 0,005\text{ s}$.

VARIÁVEIS	TEMPO DE SIMULAÇÃO						
	COND. INICIAL	1 min	2 min	3 min	4 min	5 min	10 min
TA2	35,0	41,45	43,40	43,93	44,08	44,12	44,13
TG1	25,0	25,19	25,17	25,17	25,16	25,16	25,16
TG2	20,0	18,53	18,53	18,53	18,53	18,53	18,52
T1	25,0	28,37	28,86	29,03	29,07	29,08	29,08
T2	30,0	66,56	67,82	68,17	68,26	68,29	68,30
T3	35,0	40,35	41,09	41,30	41,36	41,37	41,38
T4	20,0	25,27	25,76	25,89	25,93	25,94	25,94
T6	5,0	6,33	6,37	6,38	6,38	6,38	6,38
COP	8,169	7,045	6,881	6,837	6,825	6,822	6,820

Estas figuras mostram que quanto maior o passo de simulação (maior incremento de tempo Δt) pior a precisão dos valores simulados.

Foi observado que, para estas condições iniciais, a utilização de um passo de 0,7 segundos provoca uma divergência nos valores calculados com a parada da execução do programa, devido à incompatibilidade de valores no cálculo do DTML.

Devido a complexidade do sistema de equações diferenciais ordinárias e equações algébricas utilizado neste modelo matemático, a determinação das condições do processo em regime estacionário foi realizada pela definição de estabilização (regime permanente), onde a variação das grandezas com relação a variação do tempo é nula ($dX/dt = 0$). A solução analítica deste sistema tornou-se muito complexa em virtude de um grande número de equações.

A partir de condições iniciais aleatórias, mostradas na tabela 15, as condições de estado estacionário foram atingidas com 10 minutos de simulação, uma vez que a variação dos valores das variáveis com o tempo pode ser considerada desprezível. Estes resultados foram obtidos com $\dot{m}_{\text{agua}} = 250 \text{ kg/h}$, $\dot{m}_{\text{ref}} = 135 \text{ kg/h}$, $\dot{m}_{\text{eglic}} = 750 \text{ kg/h}$, $q_o = 4,861 \text{ kJ/s}$ e $TA1 = 25 \text{ }^\circ\text{C}$, para o sistema de refrigeração com seus respectivos parâmetros físicos, listados anteriormente.

Para este exemplo de condições iniciais, o estado estacionário é atingido no tempo de aproximadamente 200 segundos. O erro entre os valores das variáveis no instante 200 segundos e no tempo infinito é menor que $0,01^\circ\text{C}$, com o passo de $\Delta t = 0,005 \text{ s}$, conforme visto a dinâmica de estabilização na figura 9.

Assim, para a simulação com outras condições iniciais, selecionou-se o incremento de tempo de $\Delta t = 0,01 \text{ s}$, uma vez que proporciona uma precisão aceitável em pequenos intervalos de tempo, onde poderá haver atuação do controle a cada ciclo de simulação.

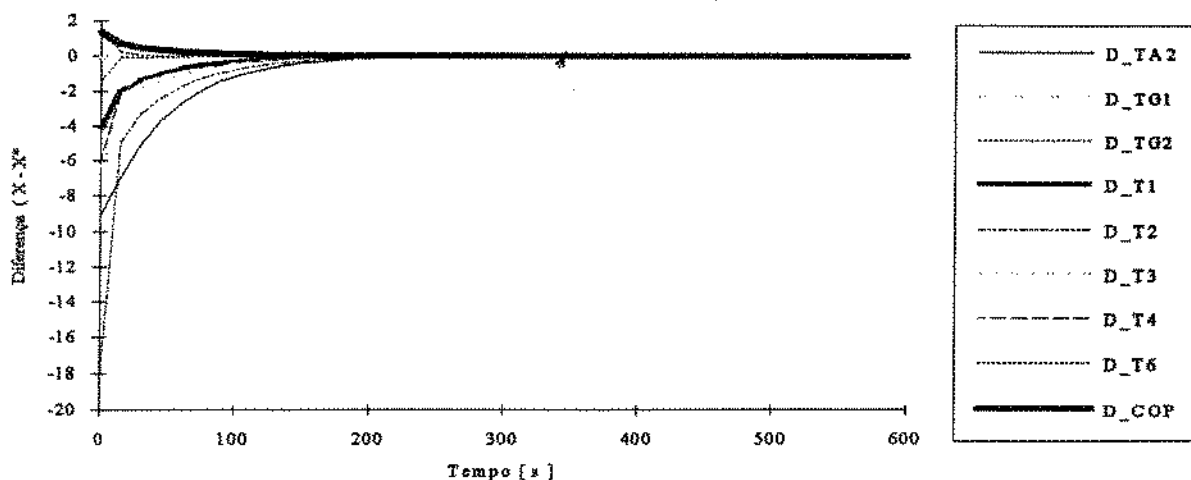


Figura 9 . Erro dos valores das variáveis com relação aos valores de regime permanente.

B) COMPORTAMENTO DINÂMICO DAS VARIÁVEIS SOB PERTURBAÇÃO

A avaliação do comportamento dinâmico do processo sob diferentes condições possibilita a verificação da intensidade e sentido dos acréscimos ou decréscimos das outras variáveis dependentes.

Assim, foi proposto simular o processo sob diferentes perturbações, conforme mostrado na tabela 16, a partir de condições estacionárias, a fim de analisar as atenuações e tendências, mostrando o comportamento das variáveis através de históricos das suas diferenças em relação aos valores iniciais, dados nas figuras 64 a 83 do anexo VI.4.2. Nestas figuras, o novo estado estacionário não é atingido, uma vez que os outros parâmetros não são alterados para compatibilizar o balanço de energia global.

São mostrados nas figuras do anexo VI.4.2., os valores médios de TG1 e COP, calculados por médias integradas no tempo de simulação (método de integração numérica trapezoidal).

Os efeitos nas variáveis sob uma perturbação do tipo degrau de 10 °C para TA1 e 7.000 kJ/h para q_0 , tanto positiva como negativa, são mostrados na tabela 17 , simbolizando a variação das respectivas variáveis de processo em relação a seus crescimentos (sentido e intensidade).

Tabela 16 . Proposição das perturbações a partir das condições estacionárias.

VARIÁVEL	CONDIÇÕES ESTACIONÁRIA	INCREMENTO DA PERTURBAÇÃO
TA1	25 °C	+ 10 °C
TA1	25 °C	- 10 °C
q _o	17.500 kJ/h	+ 7.000 kJ/h
q _o	17.500 kJ/h	- 7.000 kJ/h
• m _{ref}	135 kg/h	- 75 kg/h
• m _{ref}	135 kg/h	+ 75 kg/h
• m _{eglic}	750 kg/h	- 250 kg/h
• m _{eglic}	750 kg/h	+ 250 kg/h
• m _{agua}	250 kg/h	- 200 kg/h
• m _{agua}	250 kg/h	+ 200 kg/h

As intensidades dos efeitos qualitativos foram verificadas num tempo de até 50 segundos após a perturbação, as quais foram denominadas por símbolos, conforme seus graus de acréscimos ($\nearrow$) ou decréscimo ($\searrow$). Os graus de alteração das variáveis foram estimadas em :

Para temperaturas (acréscimo / decréscimo) :

$$\begin{aligned} \emptyset &= | \Delta T | < 0,5 \text{ }^{\circ}\text{C} \\ \nearrow / \searrow &= | \Delta T | < 2,0 \text{ }^{\circ}\text{C} \\ \nearrow\nearrow / \searrow\searrow &= 2,0 < | \Delta T | < 5,0 \text{ }^{\circ}\text{C} \\ \nearrow\nearrow\nearrow / \searrow\searrow\searrow &= | \Delta T | > 5,0 \text{ }^{\circ}\text{C} \end{aligned}$$

Para o C.O.P. :

$$\begin{aligned} \emptyset &= | \text{C.O.P.} | < 0,5 \\ \nearrow / \searrow &= 0,5 < | \text{C.O.P.} | < 1,0 \\ \nearrow\nearrow / \searrow\searrow &= 1,0 < | \text{C.O.P.} | < 2,0 \\ \nearrow\nearrow\nearrow / \searrow\searrow\searrow &= | \text{C.O.P.} | > 2,0 \end{aligned}$$

Tabela 17 . Efeitos qualitativos das variáveis de processo sob perturbação em degrau das variáveis externas (10 °C para TA1 e 7.000 kJ/h para q_o).

Variáveis externas	Ocorrência	TA2	TG1	T3	T6	T1	COP	T2
q _o	↗	↘	↗↗	↗	↗	↗	↗	↘
	↘	↗	↘↘	↘	↘	↘	↘	↗
TA1	↗	↗↗	↗	↗↗	↗	↗↗	↘↘↘	↗↗↗
	↘	↘↘	↘	↘↘	↘	↘↘	↗↗↗	↘↘↘

onde : ↗ simboliza aumento e ↘ simboliza decréscimo

Foi também aplicada uma variação em degrau nas variáveis de controle ($\dot{m}_{ref} = \pm 75 \text{ kg/h}$, $\dot{m}_{agua} = \pm 200 \text{ kg/h}$ e $\dot{m}_{eglic} = \pm 250 \text{ kg/h}$) e verificado o efeito nas variáveis de processo, mostrados na tabela 18.

Tabela 18 . Efeitos qualitativos das variáveis de processo devido a atuações das variáveis de controle.

Variáveis de controle	Ocorrência	TA2	TG1	T3	T6	T1	COP	T2
$\dot{m}_{ref}$	↗	↗	↘↘	↗↗	↘↘↘	↘	↘↘↘	↗↗↗
	↘	↘	↗↗	↘↘	↗↗↗	↗	↗↗↗	↘↘↘
$\dot{m}_{agua}$	↗	↘↘↘	0	↘↘	0	↘	↗	↘↘
	↘	↗↗↗	0	↗↗	0	↗	↘	↗↗
$\dot{m}_{eglic}$	↗	0	↘	0	↗	↗	↗	↘
	↘	0	↗	0	↘	↘	↘	↗

Esta etapa mostra a sensibilidade das variáveis do processo sob as perturbações nas diferentes condições externas de operação.

Evidenciou-se em algumas das figuras do anexo VI.4.2., o histórico das variáveis TG1 e COP em cada caso da tabela de proposições (tabela 16), a fim de obter uma leitura exclusiva das duas variáveis que estarão em evidência para as aplicações das lógicas de controle.

A avaliação do comportamento do processo sob alterações das variáveis de controle ($\dot{m}_{eglic}$,

$\dot{m}_{\text{água}}$ e $\dot{m}_{\text{ref}}$), quanto a suas influências e tendências das variáveis em regime dinâmico, subsidia a formação do banco de conhecimento da base de dados *nebuloso*.

Observa-se ainda, que as atuações do controlador, num caso real, serão efetuadas no equipamentos que promovem as alterações das vazões mássicas (por exemplo, na rotação do compressor e na rotação das bombas hidráulicas), admitindo a hipótese destes equipamentos serem ajustados de forma contínua e com eficiência constante.

Uma vez efetuada a perturbação, as variáveis do processo alteram em função desta nova condição de operação, porém as variáveis de controle mantêm-se fixas, sem que haja interferência sobre o sistema.

II.5. CONCLUSÕES

1) O modelo elaborado mostrou-se :

- * Contínuo na faixa de operação utilizado.

- * Coerente com os resultados das tendências, mesmo com as simplificações realizadas

(sem influência fluido-dinâmica, homogeneidade de mistura e outras).

- * Convergente até incremento de tempo de 0,06 s.

2) O software desenvolvido para a simulação do processo de refrigeração, utilizando o modelo proposto, é versátil para alterações de condições de operação e possui ótimo ambiente iterativo software / usuário, assim como um supervisor.

3) A avaliação do comportamento do processo sob perturbações das variáveis externas (TA_1 e q_o) e das variáveis de controle ($\dot{m}_{\text{cglc}}$, $\dot{m}_{\text{água}}$ e $\dot{m}_{\text{ref}}$) possibilitam a decisão da forma de atuação quanto ao tipo, intensidade e sentido das variáveis de controle.

4) A sensibilidade das variáveis do processo simulado sob perturbações subsidia o banco de conhecimento para a organização das regras *linguísticas* na formação do programa inteligente de controle, uma vez que se dispõe das intensidades e tendências dos desvios das variáveis, a fim de atuar no sentido corretivo ao estado de operação desejado.

5) A variável de controle que possui a maior velocidade na alteração do C.O.P. é a vazão de refrigerante, e a variável de perturbação do processo que possui a maior velocidade na alteração do C.O.P. é a temperatura de entrada de água de resfriamento do condensador.

III. CAPÍTULO : CONTROLE NEBULOSO

III. 1 . INTRODUÇÃO À LÓGICA NEBULOSA

A abordagem linguística da lógica nebulosa vem sendo usada na descrição de processos com grande êxito e representa a última geração de controle de processos. Pretende-se apresentar sua aplicabilidade em um processo específico e delinear uma metodologia que possibilite sua qualificação entre outros tipos de controle.

A lógica *Nebulosa* para controle de processo diferencia de outras pela não necessidade de modelamento matemático e permitindo a incorporação de parâmetros empíricos para a adequação da função de transferência do sistema.

Há pouquíssima aplicação deste tipo de controle em processos termodinâmicos ou térmicos, tornando pioneira na utilização nesta linha de pesquisa.

O desenvolvimento da Lógica *Nebulosa*, aliado com a inteligência artificial, deverá atingir a controles em outros processos, já que sua credibilidade está promovendo grandes investimentos em pesquisa, apresentando estimativas de produtos para o mercado mundial de cerca de US\$ 16 bilhões para o ano 2000, segundo a revista "The Economist" (1994).

A descrição de processos biológicos e de alimentos através de modelos matemáticos convencionais para processos de otimização e controle é frequentemente difícil, devido a natureza complexa dos processos, a informações insuficientes, inadequadas e não precisas. As simplificações e hipóteses feitas nos modelos convencionais podem implicar em resultados não reais ou mesmo imprecisos.

A Lógica *Nebulosa* introduzida por ZADEH (1965) oferece uma solução alternativa pela inclusão de conhecimentos específicos em modelos de processos.

A Lógica *Nebulosa* aplicada em controle de processo permite a inclusão de conhecimentos subjetivos e empíricos nos modelos de controle. Esta lógica com a base de conhecimento possibilitam decisões semelhantes à humana de forma ideal. Assim, modelos de processos podem ser construídos, usando todos os tipos de informação disponíveis, tanto em otimização como em controle, sem o exato conhecimento matemático do processo.

O perfeccionismo do modelo convencional de um processo, onde se busca a precisão, pode deixá-lo muito complexo, em virtude do elevado número de parâmetros a serem estimados.

ZADEH (1965) propõe pela Lógica *Nebulosa* uma simplificação das super-modelagens .

Com esta simplificação, a Lógica *Nebulosa* se aproxima da linguagem humana no uso de conceitos para descrição de atributos dos conhecimentos como : alto, baixo, frio, quente e outros, que são parâmetros subjetivos e suficientes para a tomada de decisões.

Nos últimos anos, foram lançados no Japão alguns produtos eletrodomésticos com controle *nebuloso* como por exemplo:

- Condicionador de ar (1989 - Mitsubishi) com sensores infra - vermelho que reconhecem a quantidade de pessoas e com um software de controle baseado em regras *Nebulosas* que pode economizar até 24 % de energia elétrica ;
- Máquina de lavar roupas (1990 - Matsushita), com sensores de quantidade de roupas, de sujidade, de nível e outros ;
- Outras aplicações : controle de Metrô , elevadores, câmaras filmadoras, televisores e outros.

Aplicações como extrusão de cereais já foram implementados com controladores PID, onde se incorporou regras linguísticas como descrito no trabalho de EERIKAINEN et alii (1988), mostrando a facilidade e efetividade de controlar um processo de extrusão otimizado através da lógica *nebulosa*.

SHIECH et alii (1992) mostram que usando a lógica *nebulosa* obtem-se maior eficiência no controle de temperatura em pasteurizador HTST ("*High Temperature Short Time*").

ZHANG & LITCHFIELD (1993) apresentam uma aplicação de um controlador nebuloso no processo de secagem de grãos em fluxo cruzado contínuo . Este trabalho mostra a viabilidade do controle nebuloso em muitos processos de alimentos, os quais são difíceis de controlar automaticamente com controles convencionais devido a natureza complexa deste processos.

Há quem diga que a lógica nebulosa veio para ficar ("*Fuzzy logic is here to stay* "), já que a lógica *Nebulosa* representa a maior onda tecnológica para a década e o centro para inteligência artificial do século XXI.

III. 1. 1. LÓGICA NEBULOSA

A Lógica *Nebulosa* é baseada em funções de associações correspondentes a vários condicionais multi variáveis, da forma das relações do tipo : SE / ENTÃO.

As variáveis de processos monitoradas terão graus de pertinência no intervalo real $[0, 1]$, das quais obter-se-á um valor desnebulizado para atuação na variável de controle do processo de acordo com o grau de influência que esta provoca no sistema.

Os modelos de controle de processos são tipicamente multi-dimensionais e multi-condicionais simultaneamente, relacionados com as funções de associações.

Os algoritmos de controle da Lógica *Nebulosa* utilizam termos lingüísticos para descrever as variáveis do processo com segurança, economia, efetividade, facilidade e aplicabilidade sem a necessidade de modelos matemáticos.

III . 1 . 2 . TEORIA DE CONJUNTOS NEBULOSOS

Na teoria dos conjuntos nebulosos (ZADEH, 1965), a base da Lógica nebulosa (*Fuzzy Logic*), foi primeiro apresentada pelo Professor de Ciência de Computação Lotfi A. Zadeh da Universidade da Califórnia em Berkeley.

Qualquer elemento do universo de discurso pertence a um conjunto "nebuloso" a um grau variável de zero (pertinência nula) a um (pertinência total).

A pertinência de um elemento é dada por uma função característica do conjunto (função de pertinência), que associa um grau de pertinência a cada elemento do universo de discurso.

Os conjuntos nebulosos de Zadeh representam uma generalização dos conjuntos ordinários ou convencionais.

Designando por $X = \{ x_1, x_2, x_3, \dots, x_n \}$ o universo de Discurso, a função de pertinência para conjuntos ordinários se expressa por:

$$\psi (x_i) = 1 \rightarrow x_i \in X$$

$$\psi (x_i) = 0 \rightarrow x_i \notin X$$

A definição generalizada da função de pertinência ou a função de associação no caso de um conjunto nebuloso é :

$$\psi (x_i) \in [0,1] \quad \forall x_i \in X$$

O conjunto nebuloso é caracterizado por uma função característica (função de associação), a qual atribui a cada elemento uma pertinência entre "zero" e "um" .

Deste modo um conjunto nebuloso "A" em "X" pode ser representado como um conjunto de pares ordenados de elementos "x" e seu respectivo grau de pertinência:

$$A = \{ (x_i, \psi (x_i)) \mid x_i \in X \}$$

Conforme o Universo de Discurso seja contínuo ou discreto, um conjunto *Nebuloso* se escreve como:

- Quando X é contínuo, um conjunto nebuloso "A" pode ser escrito de modo conciso como :

$$A = \int \psi_A(x_i) / x_i$$

- Quando X é discreto, o conjunto nebuloso "A" pode ser representado por :

$$A = \sum_{i=1}^n \psi_A(x_i) / x_i$$

onde os símbolos de integral e somatória referem à justa posição dos elementos.

Define-se como conjunto suporte de um conjunto nebuloso definido no Universo de Discurso "X" o conjunto ordinário constituído de todos os pontos de " x_i " em "X" tal que $\psi_A(x) > 0$. Ou seja, é o subconjunto do universo em discurso, cujos elementos têm grau de pertinência diferente de zero. Em particular, o ponto " x_i " onde $\psi_A(x) = 0,5$ é chamado de ponto limiar.

As operações sobre conjuntos, tais como União, Intersecção e Complemento são definidas para conjuntos nebulosos, através de suas funções de pertinência :

UNIÃO : Sejam A e B dois conjuntos nebulosos em X com funções de pertinência ψ_A e ψ_B , respectivamente.

A função de pertinência ψ_C de $C = A \cup B$ é definida ponto a ponto para todo $x \in X$:

$$\psi_C = \max(\psi_A(x), \psi_B(x)) \text{ e}$$

$$A \cup B = \int_x [\psi_A(x) \vee \psi_B(x)] / x$$

onde $\vee$ é o símbolo para máximo.

INTERSECÇÃO : A função de pertinência ψ_C de $C = A \cap B$ é definida ponto a ponto para todo $x_i \in X$:

$$\psi_C = \min(\psi_A(x), \psi_B(x)) \text{ e}$$

$$A \cap B = \int_x [\psi_A(x) \wedge \psi_B(x)] / x$$

onde $\wedge$ é o símbolo para mínimo.

COMPLEMENTO : A função de pertinência ψ_C de $C = A$ é definida ponto a ponto para todo $x \in X$:

$$\psi_C(x) = 1 - \psi_A(x)$$

Outras definições, operações e propriedades dos conjuntos Nebulosos, podem ser encontradas de forma mais aprofundada nos trabalhos de KANDEL (1986) e ZADEH (1965).

III. 1. 3. CONTROLE NEBULOSO

Devido a dificuldades encontradas na automação de processos, tais como : complexidade dos fenômenos simultâneos, modelagem matemática, precisão do modelo, tempo de atuação do controle pelos algoritmos, não linearidade de processos, condições variáveis com o tempo e conhecimento do processo, o controle *nebuloso* torna-se conveniente em relação a outros, uma vez que possui as facilidades quanto à adequação da estratégia de controle humano, ao protocolo de controle, à simplicidade das leis de controle, à flexibilidade das variáveis linguísticas e quanto a precisão para implementação no computador.

Os conjuntos nebulosos são importantes pois conseguem representar conhecimentos imprecisos ou difusos, que podem ser expressos e manipulados de modo a gerar decisões.

A linguagem humana utiliza, freqüentemente, conceitos (termos linguísticos) para a descrição de conhecimentos.

As regras linguísticas de um algoritmo de controle nebuloso espelham o processo de tomada de decisão que é utilizado no dia a dia. Considerando o exemplo de ajuste da temperatura da água de um chuveiro elétrico. Uma regra poderia ser : quando a água está fria, fecha-se um pouco a torneira, de modo que a vazão de água diminua um pouco e com isso a água fique um pouco mais quente. Verifica-se que um controle com a lógica humana assemelha-se a lógica *nebulosa*.

Esta descrição de uma forma de raciocínio humano é rica em conceitos, tais como muito fria, fechar um pouco, diminuir um pouco, um pouco mais quente, que apesar de não estarem quantificados, em termos do valor da temperatura da água, o número de voltas da torneira, vazão em litros por segundo e taxa de variação da temperatura da água, conseguem expressar um conhecimento que é manipulado pelo cérebro humano, gerando decisões que podem levar ao controle da temperatura da água.

Este tipo de conhecimento pode ser descrito por intermédio de variáveis linguísticas, as quais

são definidas como variáveis que assumem conceitos como valores, ao invés de números. Deste modo, uma variável linguística temperatura pode assumir como valores, os conceitos "baixa", ou "alta", assim como uma variável linguística água pode assumir os conceitos "quente" ou "fria".

Já que um conceito pode ser representado por meio de um conjunto nebuloso, então descreve-se uma variável linguística como uma variável, cujo valor é associado ao conceito representado pelo conjunto nebuloso dado como atributo. Do mesmo modo, uma dada grandeza física pode estar relacionada a vários conceitos simultaneamente. Exemplificando, uma variável linguística "temperatura", pode assumir diferentes valores, por exemplo, "baixa", "média" e "alta" ao mesmo tempo, somente com diferentes graus de pertinência aos três conjuntos, ou seja, pode-se ter um grau de pertinência de 0,9 para o conjunto "alta", um grau de 0,7 para "média" e 0,2 para "baixa".

Os conceitos (ou termos linguísticos) podem ser combinados por meio de conectivos lógicos, tais como a conjunção ($\wedge$, and, e), a disjunção ($\vee$, or, ou) e a negação ($\text{not}(x)$, não x). Estes conectivos representam, na lógica nebulosa as idéias de intersecção, união e complemento, respectivamente, de maneira semelhante aos conceitos da teoria de conjuntos convencionais.

A interpretação destes conectivos se dá, conforme as definições de união, intersecção e complemento para os conjuntos nebulosos. As associações são, por exemplo, do tipo

- * muito quente ou muito frio;
- * médio e alto (no sentido de alto, mas não muito alto);
- * (não muito pequeno) e (não muito grande).

Uma proposição nebulosa é a atribuição ou associação de um conceito (representado por um conjunto nebuloso ou por um conjunto formado pela associação de vários conjuntos nebulosos por meio dos conectivos lógicos nebulosos) a uma variável linguística.

As construções podem ser do tipo :

Temperatura é alta; Água é quente; Tamanho é [(não muito pequeno) e (não muito grande)].

ou do tipo :

$x \text{ é } A$, $y \text{ é } B$, $z \text{ é } (A \vee (-B))$

as quais são chamadas de proposições nebulosas.

A proposição nebulosa é representada genericamente por uma construção do tipo ($x \text{ é } A$), onde x é uma variável linguística e A é um conjunto nebuloso, ou então pelo par cartesiano (x , A).

A conjunção de "n" proposições nebulosas ($x_1 \text{ é } A_1$), ..., ($x_n \text{ é } A_n$), representada genericamente por ($x_1 \text{ é } A_1$) e e ($x_n \text{ é } A_n$), pode ser representada por uma proposição nebulosa da forma ($x_1, \dots, x_n$) é A, onde A é o produto cartesiano $A_1 \times \dots \times A_n$.

Os conjuntos nebulosos permitem um grau de pertinência entre 0 e 1. Esta pertinência ou funções de associações são processadas usando as regras de operação (regras nebulosas): "if ... then" ou "se ... então".

Estes comandos condicionais, baseados na teoria de conjuntos nebulosos, envolvem produtos lógicos (mínimos) dos blocos antecedentes "if", os quais são combinados dentro das somas lógicas (máximos) dos blocos consequentes "then".

A principal fonte de conhecimento para construir o algoritmo de controle vem do protocolo de controle do operador humano. O protocolo consiste num conjunto de condicionais (se - então), onde a primeira parte é chamada de antecedente (condições) e a segunda parte chamada de consequente, lida com uma ação (controle) que tem que ser realizada. Assim, da mesma forma da estratégia humana, as regras nebulosas expressam como o controle deve ser realizado quando um certo estado do processo controlado é observado, a partir do conhecimento do operador do processo. Por exemplo:

"SE temperatura baixa ENTÃO abre muito válvula"

III.1.3.1. FUNÇÃO DE PERTINÊNCIA

As funções de pertinência mais utilizadas na definição do desenvolvimento de sistemas de aplicação *nebulosos* são as curvas gaussianas, sigmoides, triangulares e trapezoidais, todas parametrizadas. Estas funções de associação podem ser de qualquer tipo, dependendo da configuração do processo e sua melhor resposta para atuação, o que é definido por razões subjetivas ou por experiência do especialista do processo. Exemplos destas funções de pertinência são mostrados na figura 10.

Diversos parametros das funções de pertinência como por exemplo a amplitude, a altura, o período podem ser variados de acordo com a necessidade de cada "conceito" representado pela variável linguística.

Cada variável do processo tem um conjunto próprio de termos linguísticos (conjuntos nebulosos) associado, definido pela partição nebulosa dos espaços de entrada / saída.

A partição nebulosa para a variável x_1 , mostrada na tabela 19, contendo seis termos linguísti-

cos e para a variável x2 com 4 termos. Uma vez medido o valor da variável x1, calcula-se o quanto este valor caracteriza os conceitos expressos pelos termos linguísticos. Assim, por exemplo, tem-se :

$$\text{para } x_1 \Rightarrow \psi_{MB}(x_1) = 0, \psi_B(x_1) = 1, \dots, \psi_{EA}(x_1) = 0$$

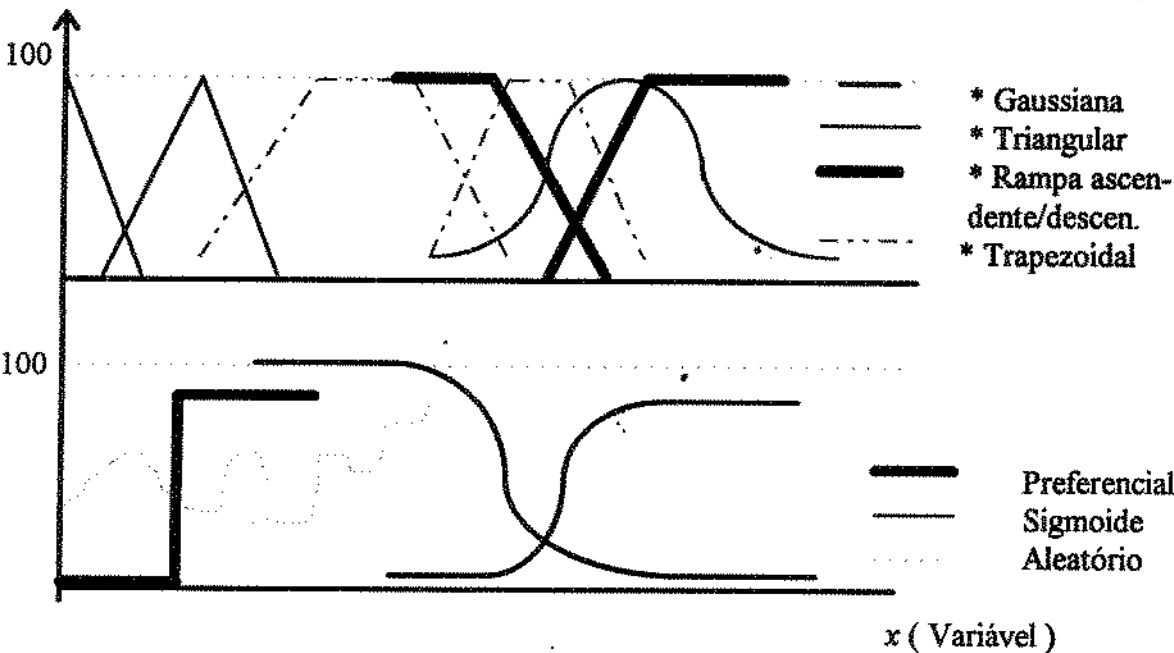


Figura 10. Exemplos de funções de pertinência.

Tabela 19 . Exemplo de funções de associação de variáveis , EERIKAINEN et alii (1988).

VARIÁVEL	VALOR LINGÜÍSTICO NEBULOSO	FUNÇÕES DE PERTINÊNCIA
X1	Muito Baixo (MB)	
	Baixo (B)	
	Médio (M)	
	Alto (A)	
	Muito Alto (MA)	
	Extra Alto (EA)	
X2	Baixo (B)	
	Médio (M)	
	Alto (A)	
	Muito Alto (MA)	

Um exemplo típico de representação da temperatura ambiente é mostrado na figura 11 , onde se apresenta a conceituação para esta variável, tanto para a teoria clássica como para a teoria dos conjunto nebulosos.

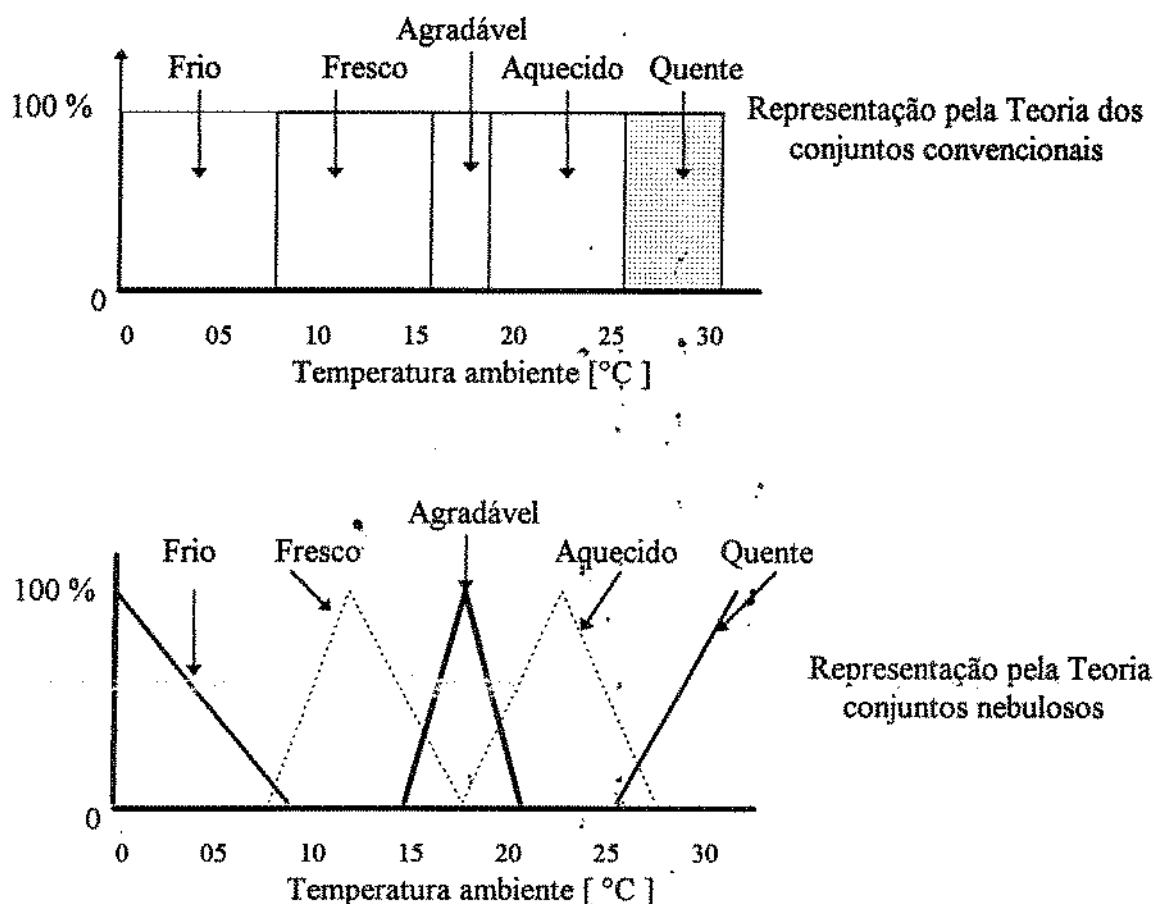


Figura 11 . Exemplos da conceituação da temperatura ambiente através dos conjuntos convencionais e dos conjuntos nebulosos.

III . 1 . 3 . 1 . 1 . FUNÇÕES DE PERTINÊNCIA ESPECÍFICAS

A lógica convencional padroniza o conceito de pertinência absoluto , ou seja , $\psi (x) = 0$ ou então 1 . Desta forma, torna-se inviável um processo, cujas condições de contorno fossem descontínua.

EERIKAINEN et alii (1988) exemplificam um processo hipotético de esterilização de um produto, cuja temperatura mínima é 100 °C, ($x \geq 100$ °C), ou seja :

$$A = \{ x_i \in X \mid x_i \in [100, \infty] \}$$

sendo que $X = \{ x_i \in X \mid x_i \in [0, \infty] \}$. Porém a qualidade do produto decresce significativamente

com altas temperaturas ($x > 90 \text{ }^{\circ}\text{C}$), ou seja :

$$B = \{ x_i \in X \mid x_i \in [0,90] \}$$

Assim, para a lógica convencional, a intersecção destes conjuntos é nula :

$$C = B \cap A = \{ x_i \in X \mid x_i \in [100,\infty] , x_i \in [0,90] \} = 0$$

Entretanto, nebulizando as condições de contorno é possível obter uma solução satisfatória, conforme mostrado na figura 12.

Foram obtidos bons resultados no processo de produção de ácido glutâmico, utilizando conceitos da lógica nebulosa (NAKAMURA et alii, 1985 , mencionado por EERIKAINEN et alii, 1988).

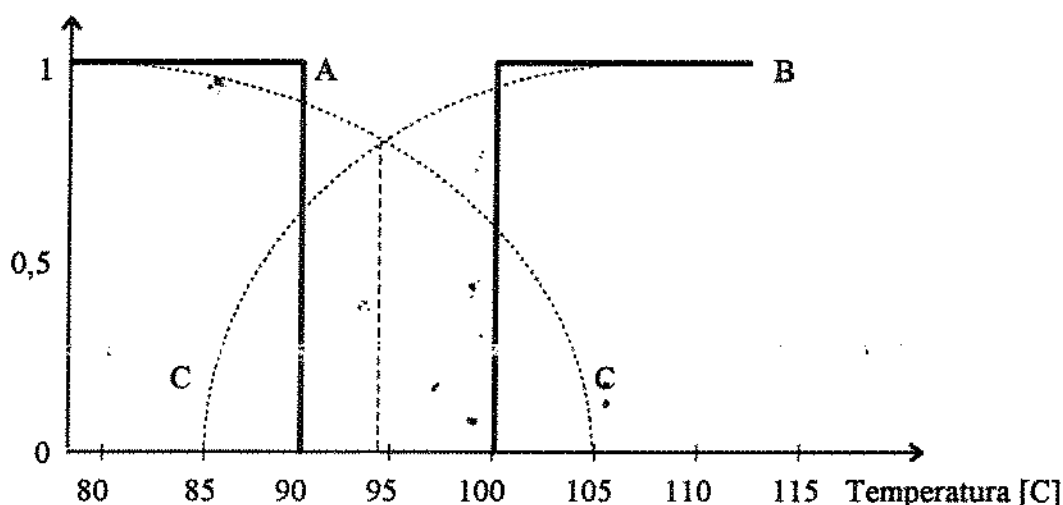


Figura 12 . Exemplo de nebulização das condições de contorno de um processo de esterilização.

Uma vez os conjuntos convencionais podem ser vistos como um caso particular dos conjuntos nebulosos, pode-se descrever a dinâmica das variáveis de um controle "on-off" e proporcional, utilizando a mesma ideia de nebulizar as variáveis.

III. 1. 3. 2. REGRA NEBULOSA

Define-se uma regra nebulosa como uma estratégia de controle que utiliza proposições nebulosas do tipo ($u_1 \text{ é } A_1$), onde u_1 é uma variável lingüística e A_1 é um conjunto nebuloso representando um conceito. A regra é formada por um antecedente representando uma condição, estruturado em termos de uma associação conjuntiva de proposições nebulosas e um conseqüente, uma outra

proposição nebulosa. A estrutura básica de uma regra nebulosa é a seguinte:

$$SE (u_1 \text{ é } A_1) E (u_2 \text{ é } A_2) E \dots E (u_n \text{ é } A_n) ENTÃO (y \text{ é } C)$$

Como exemplo pode-se ter (sendo "x" uma variável lingüística temperatura, "y" uma variável lingüística pressão e z uma variável lingüística adição de calor) regras do seguinte tipo :

$$SE (x \text{ é baixa}) E (y \text{ é alta}) ENTÃO (z \text{ é média})$$

significando no caso que para uma temperatura baixa e uma pressão alta, deve-se ter uma adição de calor média. Os antecedentes da regra podem ser considerados como uma proposição nebulosa, tendo representados por uma variável lingüística (x, y) , cujo valor é o produto cartesiano baixa x alta, definido sobre o universo de discurso $U \times V$, se a variável temperatura é definida em U e a pressão é definida em V. Ou seja, a regra é semelhante:

$$SE [(x, y) \text{ é (baixa x alta)}] ENTÃO (z \text{ é média})$$

(OBS.: A definição de "alta", "média" ou "baixa", é dada pelas funções de pertinência de cada conjunto, que, por sua vez, é dada para cada tipo de variável lingüística. Assim, o conjunto "alta" para temperaturas é totalmente independente do conjunto "alta" para pressão e o mesmo para adição de calor).

Genericamente pode-se tratar de uma regra de produção nebulosa do seguinte tipo:

$$SE (x_1 \text{ é } A_1) E (x_2 \text{ é } A_2) E \dots E (x_n \text{ é } A_n) ENTÃO (y \text{ é } C)$$

Assim o antecedente da regra pode ser descrito por uma proposição nebulosa, o que reduz a regra à seguinte forma :

$$SE [(x_1, x_2, \dots, x_n) \text{ é } A] ENTÃO (y \text{ é } C)$$

onde A é dado por $A = A_1 \times A_2 \times \dots \times A_n$

III. 1. 3. 2. 1. IMPLICAÇÃO NEBULOSA

O conectivo ENTÃO utilizado na descrição de regras nebulosas, corresponde ao operador nebuloso de implicação. Uma das maneiras de se definir a implicação nebulosa é por meio de uma relação nebulosa. Deste modo, uma regra do tipo :

$$\text{SE } (x \text{ é } A) \text{ ENTÃO } (y \text{ é } B)$$

correspondendo a $(x \text{ é } A) \rightarrow (y \text{ é } B)$ pode ser unificada em uma proposição nebulosa binária:

$$(x, y) \text{ é } R$$

onde R é a relação binária (no caso) dada por $R = A \times B$.

Assim, uma regra nebulosa genérica corresponde à seguinte fórmula:

$$[(x_1, x_2, \dots, x_n) \text{ é } A] \rightarrow y \text{ é } C$$

que pode ser reduzida a

$$(x_1, x_2, \dots, x_n, y) \text{ é } (A \times C)$$

Na formação do protocolo linguístico de um processo, há dois tipos de questões importantes para a construção do controlador nebuloso, as quais o operador, conhecedor do processo, pode prever de forma qualitativa:

- a) Forma de atuação em cada situação do processo, em caso de alguma perturbação.
- b) Comportamento do processo com a ação de perturbações.

A análise do protocolo verbal é promissora para o modelamento da ação humana em um controle de processo. Os principais aspectos a serem considerados são :

- Características do comportamento do controle humano;
- Desenvolvimento das habilidades no controle de processo;
- Diferenças individuais entre os operadores do processo;
- Organização do comportamento de controle dos operadores;
- Volume de tarefas afetando o desempenho.

A construção do controlador nebuloso, segue os seguintes passos :

1) Representa os conhecimentos contidos nas regras:

Se E_1 e DE_1 então U_1 senão

Se E_2 e DE_2 então U_2 senão

.....

Se E_n e DE_n então U_n senão

2) A entrada do controlador *nebuloso* é a saída do processo. Esta é processada pelas regras acima, através das funções de associação, resultando valores do conjunto *Nebuloso* para atuação no processo pela saída do controlador. Como o processo requer um valor não Nebuloso, então é necessário o estágio de " *desnebulização* " .

Como a teoria clássica projeta-se desde simples reguladores até controladores multi-variáveis com leis de controle sofisticada, então quanto mais preciso for o modelo para descrição do comportamento de um processo, mais complexo se torna, com muitos parâmetros a estimar. E assim a super-modelagem implica em fraves problemas para o controle.

Exemplos de controles inteligentes podem ser encontrados no controle adaptativo, bem como no controle Nebuloso.

Em um controle de malha fechada, o operador humano pode atuar como um controlador fortemente não linear com parâmetros de controle, variando com o tempo.

O protocolo de controle contendo estratégia humana pode tomar ações de controle, todos com condições variáveis com o tempo do processo, com não linearidade e com existência de perturbações.

O índice de desempenho esta depende do compromisso entre as exigências do controle do processo e a simplicidade da lei de controle.

III. 1. 3. 3. SISTEMA E CONTROLE NEBULOSOS

A Lógica nebulosa tem-se mostrado uma abordagem adequada para descrever modelos de controles em sistemas físicos. Por meio de uma série de regras nebulosas, obtém-se um modelo de controle para o sistema físico que se deseja controlar.

As condições de operação do sistema, monitoradas através de sensores, são traduzidas em termos linguísticos pelo processo de nebulização e utilizadas para disparar as regras, gerando novas

proposições nebulosas por meio da inferência nebulosa. Estas novas proposições nebulosas são então convertidas em sinais de controle pelo processo de desnebulização, os quais são enviadas aos atuadores do sistema físico.

A vantagem desta abordagem linguística (regras nebulosas) é o uso de um "conceito" que tenha uma semântica mais abrangente e mais próxima às construções sintáticas humanas, proporcionando uma descrição muito mais sintética. Ou seja, o ser humano está mais habituado a lidar com conceitos inexatos, incompletos, imprecisos, do que com proposições booleanas associadas a verdadeiro/falso. Em outras palavras o ser humano raciocina (e toma decisões) com palavras e não com números.

A etapa de aquisição do conhecimento empírico do especialista sobre o processo, é facilitada por expressões lingüísticas, podendo utilizar conceitos nebulosos. Com o uso destes conceitos, reduz-se o número de regras para descrever o controle do sistema, visto que não é necessária sua descrição minuciosa.

O fluxo de dados numa malha de controle de um sistema nebuloso é mostrado na figura 13.

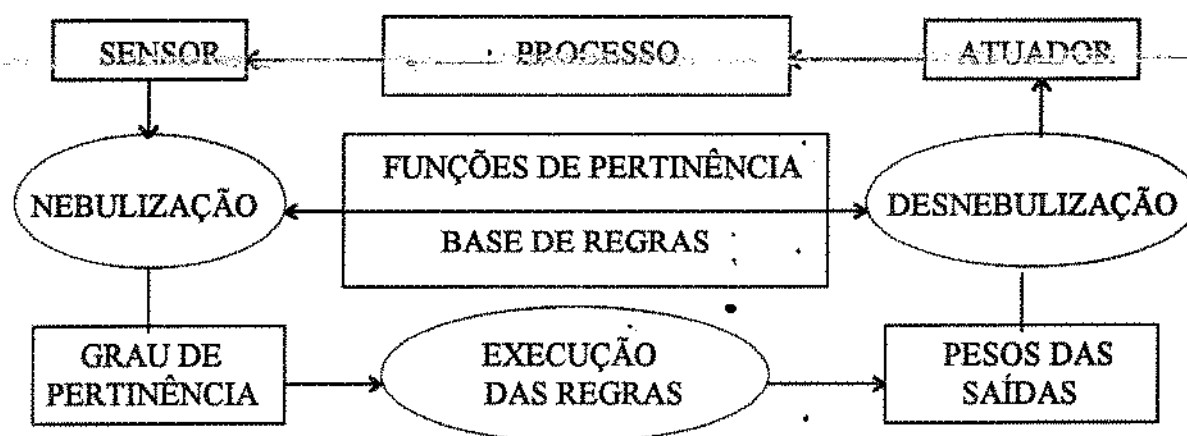


Figura 13 . Fluxo de dados em malha de controle para um Sistema Nebuloso.

III . 1 . 3 . 4 . NEBULIZAÇÃO

O processo de nebulização é a etapa responsável pela transformação escalar-*nebuloso* de um sinal recebido de um sensor, que informa o estado de alguma variável do processo, em uma proposição nebulosa do tipo x_1 é A .

Existem vários métodos pelos quais se pode nebulizar uma informação originária do processo. Utiliza-se uma variável lingüística relacionada à informação recebida do sensor, e atribui a ela um

conjunto nebuloso formado por um conjunto unitário no ponto referente ao valor informado.

Chama-se de u_1 a variável lingüística alimentada por um sinal μ_1 , a qual compõe a proposição nebulosa referente a esta informação, e U_1 o conjunto nebuloso que caracteriza a variável lingüística u_1 , conforme mostrado abaixo:

$$\begin{aligned}\mu_1 &\Rightarrow \text{NEBULIZADOR} \Rightarrow u_1 \text{ é } U_1 \\ \mu_n &\Rightarrow \text{NEBULIZADOR} \Rightarrow u_n \text{ é } U_n\end{aligned}$$

O conjunto nebuloso U_1 é caracterizado por sua função de pertinência.

A informação recebida do sensor u_1 , μ_1 , é transformada em uma proposição nebulosa do tipo " u_1 é U_1 ". Utilizando o procedimento de inferência, os sinais de controle passam do domínio numérico (representado por valores obtidos pelos sensores), para o domínio nebuloso (representado por conceitos associados aos valores).

III.1.3.5. DESNEBULIZAÇÃO

Após a obtenção dos sinais de entradas pelos sensores, a nebulização destes e as inferências através das regras linguísticas, tem-se um sinal de saída representando uma distribuição de possibilidades para o controle (conjunto nebuloso). Como o sinal tem de ser um valor escalar, deve ser obtido um valor não nebuloso que melhor represente esta distribuição (processo de desnebulização).

Um esquema simplificado do processo de desnebulização pode ser observado no esquema a seguir:

$$\begin{aligned}W_1 \in C_1 &\Rightarrow \text{DESNEBULIZADOR} \Rightarrow W_o^1 \\ W_n \in C_n &\Rightarrow \text{DESNEBULIZADOR} \Rightarrow W_o^n\end{aligned}$$

Os métodos de desnebulização existentes são (ARBEX, 1994 e SINGH & OU-YANG, 1994):

a) Método do Critério Máximo : O valor para atuação do controle é o elemento do universo de discurso correspondente ao maior grau de pertinência do conjunto nebuloso de saída.

b) Método da Média dos Máximos : O valor para a atuação do controle é obtido pela média de todas as ações de controle locais, onde a função de associação possui o valor máximo.

c) Método do Centro de Gravidade : Dentre as estratégias de desnebulização, o método

do centro de massa é o mais utilizado. Calcula-se para cada variável de controle a integral da função de pertinência de saída, definida sobre o universo de discurso, e tomando-se o ponto que divide o valor desta integral na metade, ou seja, consiste no cálculo do centro de gravidade da função de associação.

Considerando uma função de pertinência discretizada genérica $\psi_c^i(w^i)$, onde $W_j^i \in W^i$, sendo W^i o universo de discurso referente à variável linguística w^i , o ponto de centro de massa w_0^i é obtido por:

$$w_0^i = \frac{\sum_{j=1}^{q_1} \psi_c^i(w_j^i) \cdot w_j^i}{\sum_{j=1}^{q_1} \psi_c^i(w_j^i)}$$

onde:

q_1 = número de níveis de quantificação do universo de discurso W^i e $i = 1, \dots, m$;

m = número de variáveis de controle.

Após a desnebulização, tem-se para cada variável de controle w^i um valor w_0^i que é enviado para o i -ésimo atuador do sistema.

Um exemplo de aplicação de controle nebuloso em sistemas de refrigeração é fornecido em "The Economist" (1994). O trabalho original de BART KOSKO, *Fuzzy Thinking*, mostra um simples controle de um condicionador de ar com rotação variável do compressor.

Utilizando os termos linguísticos mostrados na figura 11 para representar temperatura, obteve-se um conjunto de regras de conversão dos valores de entrada (temperatura) para os valores de saída (atuação, velocidade de compressão) como descrito abaixo :

- 1) Se temperatura do ambiente é FRIA então velocidade do compressor é NENHUMA.
- 2) Se temperatura do ambiente é FRESCA então velocidade do compressor é SUAVE.
- 3) Se temperatura do ambiente é AGRADÁVEL então velocidade do compressor é MÉDIA.
- 4) Se temperatura do ambiente é AQUECIDA então velocidade do compressor é RÁPIDA.
- 5) Se temperatura do ambiente é QUENTE então velocidade do compressor é MÁXIMA.

A figura 14.a mostra como a temperatura do ambiente é convertida na velocidade do com-

pressor para que a vazão de refrigerante seja a necessária à sua condição de *referência*.

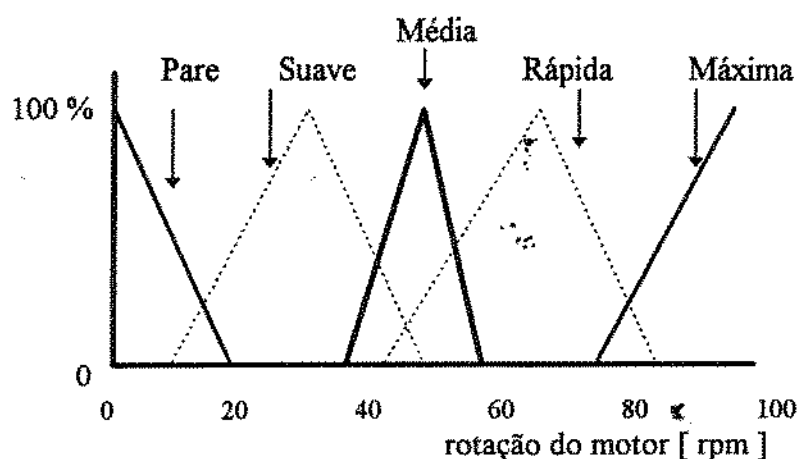
Se a temperatura do ambiente é 17,5 °C a regra 3 dispara 100 % e a velocidade do motor, determinada pelo consequente MÉDIA é 50 rpm. Com este valor de temperatura, as outras regras não disparam. Se a temperatura é 16,5 °C , então a regra 3 dispararia a 60 % (função de pertinência AGRADÁVEL) e a regra 2 dispararia a 20 % da função de pertinência FRESCA, com os respectivos consequentes: 60 % de MÉDIA velocidade e 20 % de SUAVE velocidade, conforme figura 14.b.

Assim, a velocidade final que o controlador comandará para o motor do compressor é calculada pelo centro de massa (união das figuras) de 20 % de SUAVE e de 60 % de MÉDIA, mostrada pela linha que divide-as em duas iguais áreas correspondentes a nova velocidade do motor, conforme figura 14.c. Este é o processo de desnebulização.

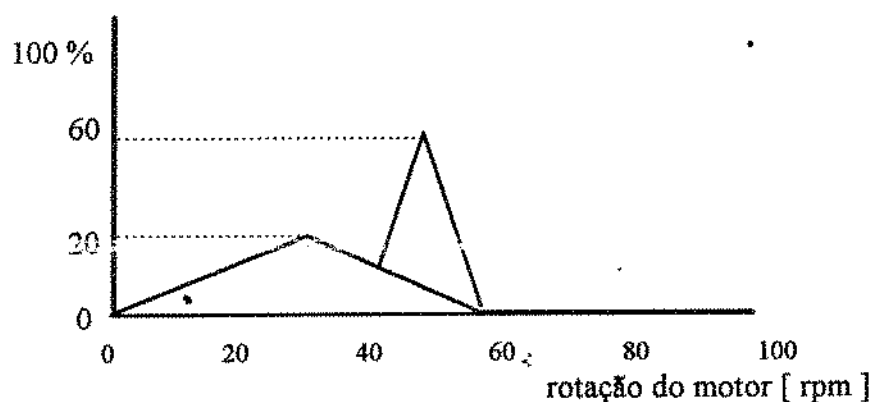
Com esta atuação o motor reduz sua velocidade e o ambiente aquece, a fim de alcançar o "set-point" de 17,5 °C de temperatura.

Havendo outras variáveis de controle, que não só a velocidade do motor, todas elas seriam atuadas, segundo cálculos individuais de suas respectivas regras.

a)



b)



c)

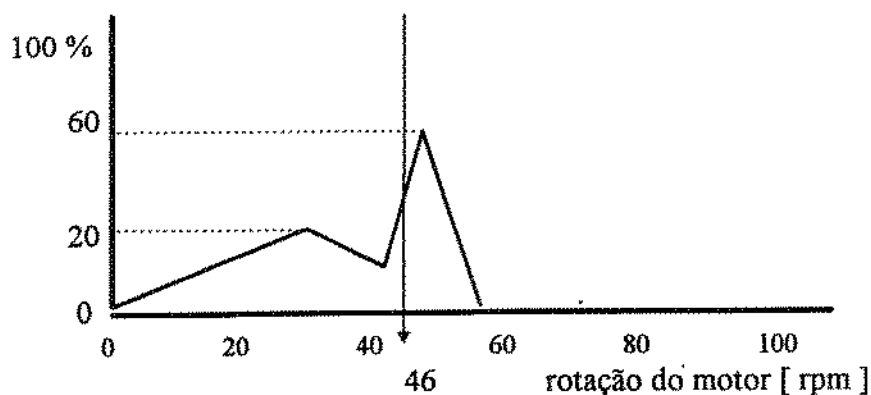


Figura 14 . Conversão da temperatura do ambiente para rotação do motor do compressor de um condicionador de ar controlado através de regras linguísticas da lógica *nebulosa*. (fonte : "The Economist", 1994).

III.1.3.6. INFERÊNCIA NEBULOSA

A inferência nebulosa é realizada de modo que a partir de uma série de regras nebulosas e de proposições nebulosas, seja possível deduzir outras proposições nebulosas e com elas, após a desnebulização, gerar os sinais de controle.

Para tal, utiliza-se a regra de inferência "Modus Ponens Generalizado", do seguinte modo:

Seja uma regra nebulosa do tipo:

$$\text{SE } (x_1 \text{ é } A_1) \text{ E } (x_2 \text{ é } A_2) \text{ E } \dots \text{ E } (x_n \text{ é } A_n) \text{ ENTÃO } (y \text{ é } C)$$

Sejam as proposições nebulosas:

$$x_1 \text{ é } A'_1, \quad x_2 \text{ é } A'_2, \quad \dots, \quad x_n \text{ é } A'_n$$

Deduz-se então a proposição nebulosa $y \text{ é } C$ onde C é dado por:

$$C = (A'_1 \text{ e } \dots \text{ e } A'_n) \cdot [(A_1 \text{ e } \dots \text{ e } A_n) \rightarrow C]$$

$$C = (A'_1 \times \dots \times A'_n) \cdot [(A_1 \times \dots \times A_n \times C)]$$

$$\psi_C(w) = \bigcup_{(u_1, \dots, u_n)} \{ [\psi_{A'_1}(u_1) \wedge \dots \wedge \psi_{A'_n}(u_n)] \wedge \dots \wedge [\psi_{A_1}(u_1) \wedge \dots \wedge \psi_{A_n}(u_n) \wedge \psi_C(w)] \}$$

sendo $(u_1, \dots, u_n)$ pertencente a $U_1 \times \dots \times U_n$

A interpretação do operador "união" é usualmente realizada pelo supremo, dentre todas as possibilidades de $(u_1, \dots, u_n)$, da equação seguinte:

$$\psi_{A'_1}(u_1) \wedge \dots \wedge \psi_{A'_n}(u_n) \wedge \psi_{A_1}(u_1) \wedge \dots \wedge \psi_{A_n}(u_n) \wedge \psi_C(w)$$

Como as funções $\psi_{A'_i}(u)$ são iguais a 0 para todo $u_i' \neq u_i^0$, onde u_i^0 corresponde ao valor da medida efetuada, para a i -ésima proposição nebulosa (conforme a estratégia de nebulização adotada) e $\psi_{A'_i}(u^0) = 1$, para todos os conjuntos A' (ou A'_i), o supremo é sempre o valor correspondente a uma escolha de $(u_1, \dots, u_n)$ em $(u_1^0, \dots, u_n^0)$.

A expressão é então simplificada para

$$\psi_C(w) = \psi_{A_1}(u_1^0) \wedge \dots \wedge \psi_{A_n}(u_n^0) \wedge \psi_C(w)$$

Calculando ψ^* (chamado de ponto de corte ou grau de disparo da regra), definido por:

$$\psi^* = \psi_{A_1}(u_1^0) \wedge \dots \wedge \psi_{A_n}(u_n^0)$$

O conjunto nebuloso resultante da aplicação da regra tem a função de pertinência abaixo :

$$\psi_{C'}(w) = \psi^* \wedge \psi_C(w)$$

Este esquema de inferência nebulosa é aplicado a todas as regras da base de regras nebulosa, gerando diversos conjuntos nebulosos inferidos. A etapa seguinte é realizar a integração dos conjuntos nebulosos referentes a mesma variável lingüística. Ou seja, após a etapa de inferência regra a regra, tem-se uma série de proposições nebulosas do tipo :

$$y_1 \text{ é } C_1', y_2 \text{ é } C_2', \dots, \text{ etc.}$$

Algumas proposições nebulosas serão certamente referentes a uma mesma variável lingüística, como por exemplo :

$$y_4 \text{ é } C_2', y_4 \text{ é } C_5', y_4 \text{ é } C_8'', \dots, \text{ etc.}$$

Neste caso, é necessário promover a união destas proposições nebulosas, efetuando a união dos conjuntos inferidos, resultando em :

$$y_4 \text{ é } [C_2', C_5', C_8', \dots]$$

Após a etapa de união, a inferência nebulosa está realizada. Estas proposições nebulosas poderão então ser transformadas em sinais de controle por meio da desnebulização.

III. 2 . MATERIAIS E MÉTODOS

III. 2 . 1 . MATERIAIS

Os materiais utilizados no controle do processo de resfriamento de líquido com o sistema de refrigeração estão divididos em *hardware* e *software*, uma vez que o protótipo experimental foi substituído por um programa desenvolvido de simulação. Os materiais são :

a) *hardware* :

- Micro computadores 386 DX e 486 DX .
- M.C.I. (Micro Controlador Industrial) da H.I. Tecnologia.

b) *software* :

- Programa desenvolvido de simulação dinâmica do Sistema de Refrigeração para resfriamento de líquido;
- SDAF (Sistema de Desenvolvimento de Aplicações *Fuzzy*).
- Linguagem de programação " C ".
- Excel (planilha eletrônica).
- Harwad-Graphics (software gráfico).

III. 2 . 1 . 1 . MONTAGEM DO *HARDWARE*

Uma vez que o programa de simulação do processo desenvolvido está substituindo o protótipo experimental, a instalação do controlador em malha simples é mostrada na figura 15.

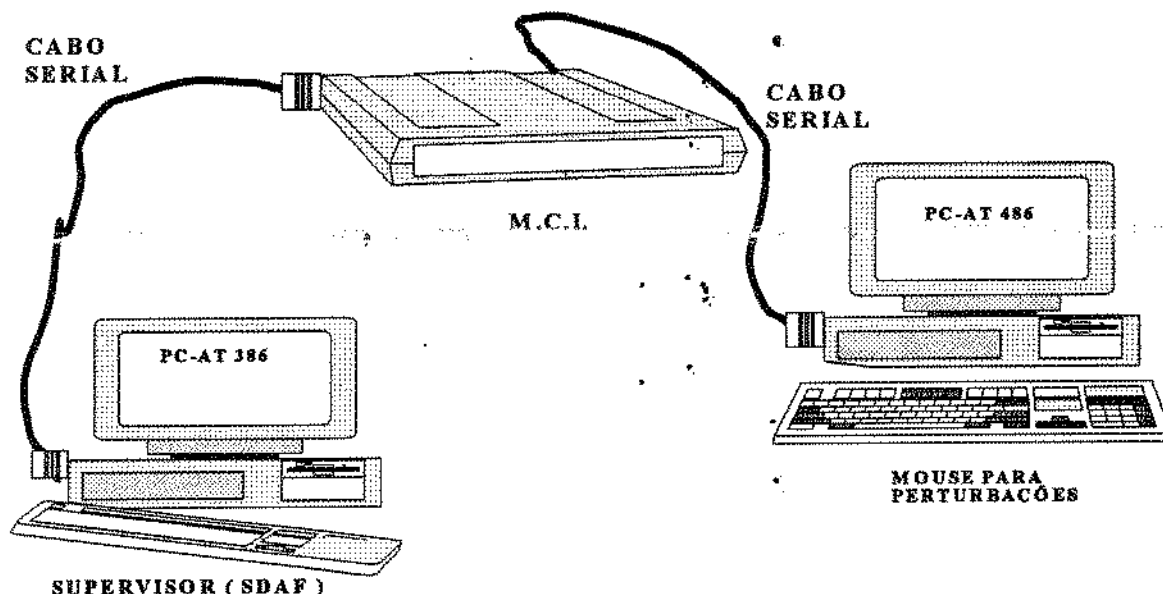


Figura 15 . Montagem do *hardware* para o controle do processo simulado.

Os equipamentos que compõe a montagem possuem as seguintes funções :

- # PC-AT 486 : simular o processo (modelo matemático) enviando os valores das variáveis de processo ao MCI, através da "porta" serial, e receber valores alterados das variáveis de controle do controlador.
- # Mouse do PC-AT 486 : perturbar o processo em simulação dinâmica, através de alteração de valores das variáveis, via "botão", optando por perturbação em degrau ou função senoidal com valores pré-determinados.

MCI : receber as informações enviadas pelo PC-AT 486 , processá-las , segundo a estratégia de controle previamente instalada em sua memória volátil, e enviar os valores alterados das variáveis de controle para o processo simulado.

PC-AT 386: supervisionar o desenvolvimento da estratégia de controle, possibilitando parametrização on-line com o MCI. O software de configuração do tipo de controle utilizado foi o SDAF da H.I. Tecnologia Ltda.

III. 2 . 2 . METODOLOGIA

Uma metodologia que possibilite a verificação da melhor estratégia de controle do processo de resfriamento de líquido com um sistema de refrigeração, é proposta a seguir:

A) Histórico das variáveis do processo em regime dinâmico sob perturbações :

A verificação do comportamento das variáveis do processo (tais como : TG1, TA2, T1, T3, T6 e C.O.P.), quanto às intensidades e tendências, quando submetidas a perturbações externas, tais como a carga térmica (q_c) e temperatura de entrada da água no condensador (TA_1), é importante para a definição da *Base de Conhecimento*.

Da mesma forma, o conhecimento dos efeitos nas variáveis de processo devido à mudança das condições das variáveis de controle (m_{ref} , m_{eglic} e m_{agua}), também possibilita a definição da intensidade e sentido de atuação no processo.

Esta etapa já foi desenvolvida no capítulo anterior, mostrada nas figuras do anexo VI.4.2.

B) Definição da base de regras nebulosas :

Como a regra nebulosa é formada por antecedentes (condição) e conseqüentes (atuação), a definição da base de regras (subsidia-las no banco de conhecimento do processo pelas intensidades e tendências dos efeitos nas variáveis de processo sob perturbação) comporá a estratégia de controle.

A partir dos efeitos no processo, resultantes das perturbações externas e atuações das variáveis de controle, propôs-se uma base de regras, semelhante a de um sistema especialista, para a automação do processo com a lógica "inteligente".

O programa de controle com a base de regras (A . REG) é mostrado no anexo VI.10.1. Foram

utilizadas cinco bases de regras (A, B, C, D e E) com a mesma estrutura, sendo diferentes a quantidade de regras e implicações relativas às variáveis de processo e de controle, mostradas na tabela 20.

As faixas utilizadas de nebulização / desnebulização das variáveis de processo e de controle são mostradas nas tabelas 21 e 22, sendo esta última utilizada para obter valores mais sensíveis ao erro.

Tabela 20 . Proposição de diferentes Bases de regras com as respectivas variáveis de processo e de controle.

Programa de Bases de Regras	Variáveis de processo	Variáveis de controle
A	TG1, TA1, TA2, q _o , T1, T3, T6, COP	m _{ref} , m _{agua} , m _{eglic}
B	COP	m _{ref} , m _{agua} , m _{eglic}
C	TG1	m _{ref}
D	TG1, TA1, T1, T3, T6	m _{ref} , m _{agua} , m _{eglic}
E	COP, TG1, TA1, q _o	m _{ref} , m _{agua} , m _{eglic}

Tabela 21 . Faixa de nebulização/ desnebulizaçõ das variáveis de processo e de controle.

VARIÁVEL	TIPO DE VARIÁVEL	FAIXA DE OPERAÇÃO DA VARIÁVEL_ERRO
err_ q _o	Processo	-7.500 a + 7.500 kJ/h
err_TA1 , err_TA2 , err_TG2	Processo	-15 a +15 ° C
err_T3 , err_T6 , err_T1	Processo	-15 a +15 ° C
err_COP	Processo	- 7 a + 7
m _{ref}	Controle	70 a 200 kg/h
m _{agua}	Controle	50 a 450 kg/h
m _{eglic}	Controle	500 a 1000 kg/h

Tabela 22. Faixa de nebulização/ desnebulização das variáveis de processo e de controle.

VARIÁVEL	TIPO DE VARIÁVEL	FAIXA DE OPERAÇÃO DA VARIÁVEL_ERRO
err_qo	Processo	-4.000 a + 4.000 kJ/h
err_TA1 , err_TA2 , err_TG2	Processo	-5 a +5 ° C
err_T3 , err_T6 , err_T1	Processo	-5 a +5 ° C
err_COP	Processo	- 5 a + 5
• m_ref	Controle	70 a 200 kg/h
• m_agua	Controle	50 a 450 kg/h
• m_glic	Controle	500 a 1000 kg/h

C) Seleção das funções de pertinência para as variáveis de processo e de controle :

O algoritmo de controle *Nebuloso* exige a definição das variáveis nos seus valores mínimos e máximos, utilizando diferentes tipos de funções (Gaussiana, Sigmóide, Triangular e outras) de modo a melhor adequar ao sistema. Estas funções são parametrizadas de acordo com os limites fornecidos pelo "conhecedor" do processo ou por determinação experimental:

Foram escolhidos para ensaios dois tipos de funções de pertinência (sigmóide e triangular). Esta escolha baseou-se no comportamento das variáveis de processos e na forma de atuação. Entretanto a verificação da adequação desta seleção se dará pelos resultados do controle de processo :

C.1.) Função de pertinência do tipo triangular :

As funções de pertinência selecionadas para cada variável são do tipo triangular. A posição de cada função depende do termo linguístico que ela representa, conforme mostrado na tabela 23 e figura C.1a.

Utilizando ainda as funções de pertinência do tipo triangular, a fim de obter valores mais sensíveis ao erro, foram aterados alguns parâmetros dos termos linguísticos (nos antecedentes e nos consequentes : neg_err_var/baixo_var, zero_err_var/medio_var e pos_err_var/alto_var , tanto na base triangular como no ponto médio), conforme tabela 24 e figura C.1b, uma vez que a comunicação com o controlador se dá em pequenos intervalos de tempo, onde não haveria erros de grande dimensão, a não ser pelas perturbações externas.

Tabela 23 . Níveis de pertinência de cada variável e parâmetros para o tipo triangular.

Termos lingüísticos de pertinência		Base	Altura	Ponto médio
ANTECEDENTES	CONSEQÜENTES			
muito_neg_err_var	muito_baixo_var	$0,4 \cdot \Delta$	1,0	$X_{\min} + 0,0 \cdot \Delta$
neg_err_var	baixo_var	$0,4 \cdot \Delta$	1,0	$X_{\min} + 0,2 \cdot \Delta$
zero_err_var	medio_var	$0,3 \cdot \Delta$	1,0	$X_{\min} + 0,5 \cdot \Delta$
pos_err_var	alto_var	$0,4 \cdot \Delta$	1,0	$X_{\min} + 0,8 \cdot \Delta$
muito_pos_err_var	muito_alto_var	$0,4 \cdot \Delta$	1,0	$X_{\min} + 1,0 \cdot \Delta$

onde : Δ é a faixa de operação de cada variável (var).

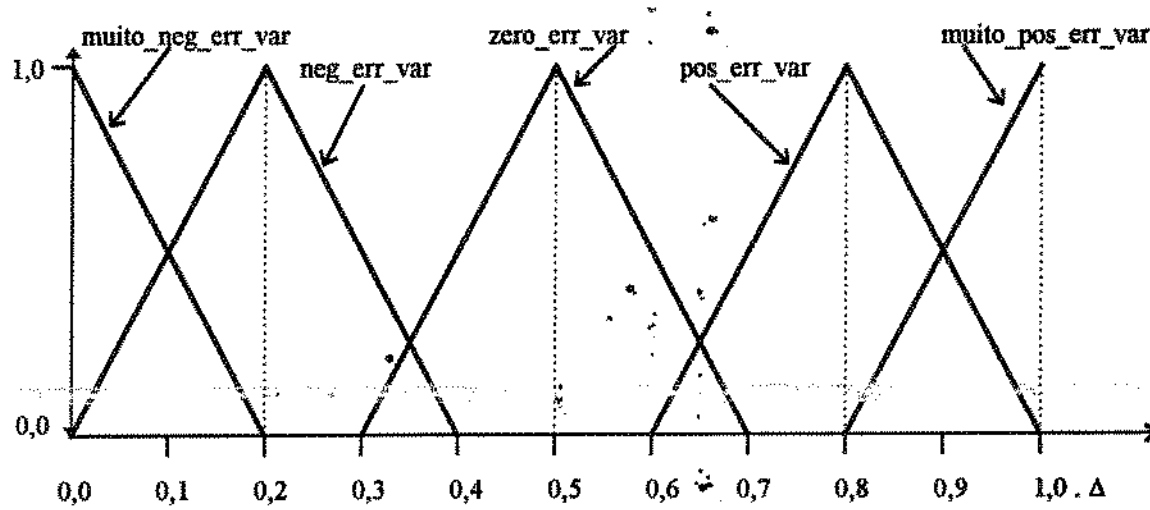


Figura C.1a. Funções de pertinência do tipo triangular, conforme tabela 23.

Tabela 24 . Níveis de pertinência de cada variável e parâmetros para o tipo triangular.

Termos lingüísticos de pertinência		Base	Altura	Ponto médio
ANTECEDENTES	CONSEQÜENTES			
muito_neg_err_var	muito_baixo_var	$0,4 \cdot \Delta$	1,0	$X_{\min} + 0,0 \cdot \Delta$
neg_err_var	baixo_var	$0,4 \cdot \Delta$	1,0	$X_{\min} + 0,3 \cdot \Delta$
zero_err_var	medio_var	$0,1 \cdot \Delta$	1,0	$X_{\min} + 0,5 \cdot \Delta$
pos_err_var	alto_var	$0,4 \cdot \Delta$	1,0	$X_{\min} + 0,7 \cdot \Delta$
muito_pos_err_var	muito_alto_var	$0,4 \cdot \Delta$	1,0	$X_{\min} + 1,0 \cdot \Delta$

onde : Δ é a faixa de operação de cada variável (var).

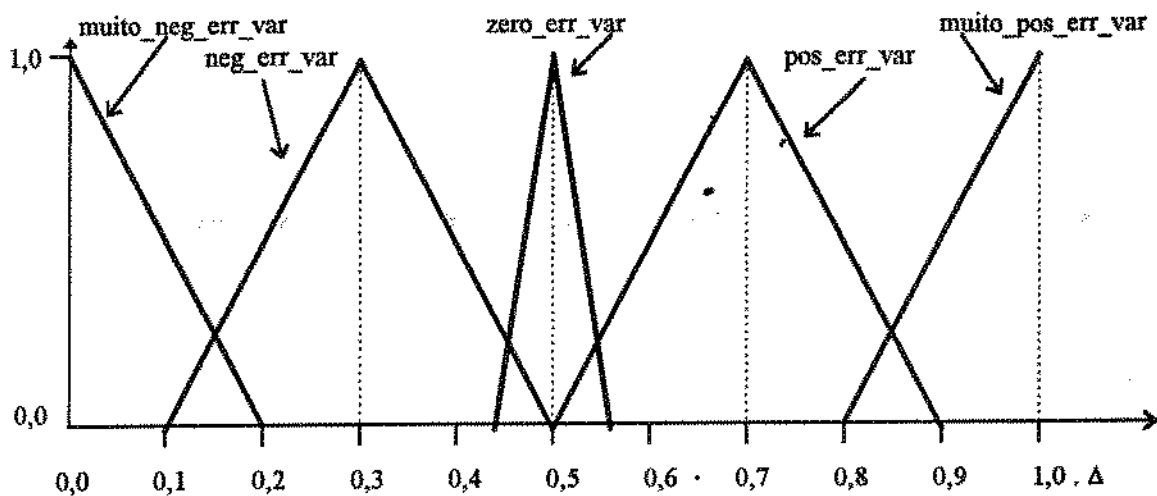


Figura C.1b. Funções de pertinência do tipo triangular, conforme tabela 24.

C.2.) Função de Pertinência do tipo sigmóide / triangular:

As faixas de nebulização / desnebulização das variáveis de processo e controle para estes ensaios estão mostradas na tabela 22, e os níveis de pertinência de cada termo lingüístico para os antecedentes e conseqüentes com sua parametrização são mostrados na tabela 25 e figura C.2.

Estes ensaios foram testados com um número menor de termos lingüísticos, restringindo a faixa de operação.

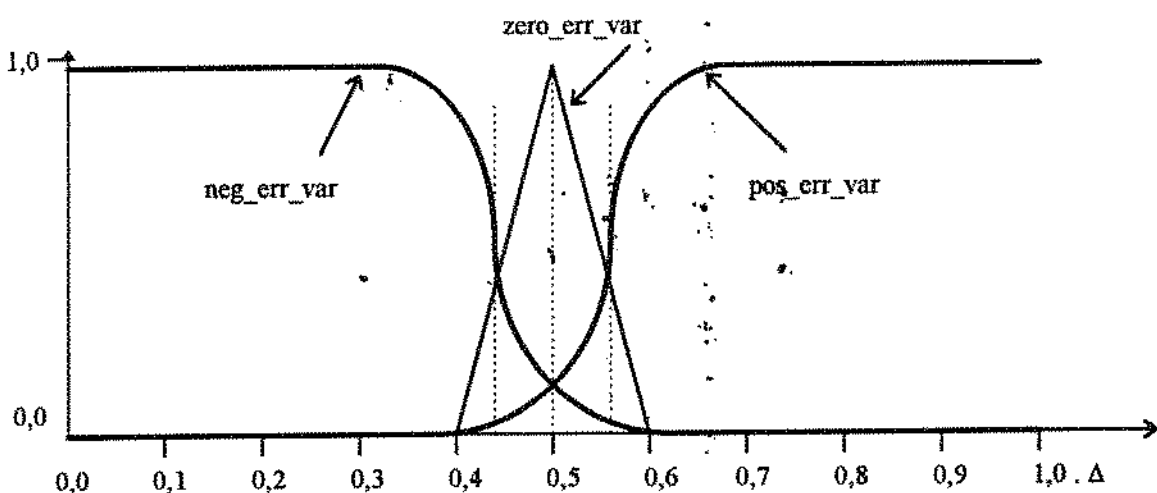


Figura C.2. Funções de pertinência do tipo triangular e sigmóide, conforme tabela 25.

Tabela 25 . Níveis de pertinência de cada variável e parâmetros para o tipo sigmoide/triangular.

Termos lingüísticos de pertinência		SIGMOIDE			TRIANGULAR		
		Ampli- tude	Ponto de transição	Velocidade de transição	Base	Altura	Ponto médio
ANTECE- DENTES	CONSE- QUENTES						
neg_err_var	low_var	1,0	$X_{min} + 0,45 \cdot \Delta$	-1,0			
zero_err_var	average_var				$0,2 \cdot \Delta$	1,0	$X_{min} + 0,5 \cdot \Delta$
pos_err_var	high_var	1,0	$X_{min} + 0,55 \cdot \Delta$	1,0			

onde : Δ é a faixa de operação de cada variável (var).

D) Nebulização e Desnebulização.

A rotina de controle possui as etapas de nebulização e desnebulização, que, por ora, são operacionais, executando por sua pré-parametrização.

O método de desnebulização foi o Método do Centro de Gravidade.

E) Testes de ensaios com lógica *nebulosa* .

O desempenho do controle com as diferentes bases de regras (A, B, C, D e E), com as diferentes funções de pertinência (Tabelas 23, 24 e 25) e com variações de “set-point”, foi analisado, através das simulações, a partir das combinações dos ensaios realizados.

As simulações realizadas com aplicação de diferentes programas de controle foram inicializadas com as mesmas condições das variáveis. Estes valores iniciais são as condições do processo específicas em regime estacionário, as quais, também serão utilizadas como condições de *set-point* para o controle, conforme tabela 26 .

Tabela 26 . Condições iniciais para a simulação do processo (condições estacionária).

Variável	q _o	TA1	T1	T2	T3	T4	T5	TG2
Valor	17.500 kJ/h	25,0 °C	29,34 °C	67,98 °C	41,49 °C	26,26 °C	0,0 °C	19,11
Variável	T6	TA2	TG1	C.O.P.	m _{ref}	m _{agua}	m _{eglic}	
Valor	6,98 °C	44,08 °C	25,75 °C	6,94	135 kg/h	250 kg/h	750 kg/h	

As combinações dos ensaios foram propostas para as seguintes avaliações :

E.1.) Quanto às funções de pertinência.

A proposição das simulações do processo com as mesmas variáveis de processo e de controle é mostrada na tabela 27, para perturbações de + 3.500 kJ/h e - 3.500 kJ/h de q_o , com o objetivo de avaliar o desempenho do controle com diferentes funções de pertinência e a mesma base de regras.

Tabela 27 . Proposição de ensaios com controle *nebuloso* com diferentes funções de pertinência e a mesma base de regras.

BASE DE REGRAS	FUNÇÕES DE PERTINÊNCIA	PERTURBAÇÃO
C	Triangular (Tab. 23)	+3.500 kJ/h de q_o
	Triangular (Tab. 24)	e
	Sigmoide / Triangular (Tab. 25)	-3.500 kJ/h de q_o

A condição de “*set-point*” da variável TG1 é a mesma da tabela 26 (condições estacionárias).

E.2.) Quanto às Bases de Regras.

A proposição das simulações do processo com as variáveis de processo e de controle é mostrada na tabela 28, para perturbações de + 3.500 kJ/h e - 3.500 kJ/h de q_o , com o objetivo de avaliar o desempenho do controle com diferentes bases de regras em relação a uma mesma função de pertinência.

Tabela 28 . Proposição de ensaios com controle *nebuloso* com diferentes bases de regras e uma mesma função de pertinência.

BASE DE REGRAS	FUNÇÕES DE PERTINÊNCIA	PERTURBAÇÃO
A	Sigmoide / Triangular (Tab. 25)	+3.500 kJ/h de q_o e -3.500 kJ/h de q_o
B		
C		
D		
E		

As condições de “*set-point*” são as mesmas da tabela 26 de condições estacionárias.

E.3.) Quanto à variação do “set-point” (valor de referência).

A proposição das simulações do processo com as variáveis de processo e de controle é mostrada na tabela 29, para perturbações de + 3.500 kJ/h de q_o e sem perturbação, com o objetivo de avaliar o desempenho do controle com diferentes valores de “set-point”, tanto de TG1 (20,75 ; 25,75 e 30,75 °C) como do COP (4,94 ; 6,94 e 8,94).

Tabela 29 . Proposição de ensaios com controle *nebuloso* com diferentes valores de “set-point”, em base de regras específicas com a mesma função de pertinência.

BASE DE REGRAS	FUNÇÃO DE PERTINÊNCIA	VARIÁVEL CONTROLÁVEL	“SET-POINT”	PERTURBAÇÃO
B	Sigmoide / Triangular (Tab. 25)	C.O.P.	4,94	+3.500 kJ/h de q_o
			6,94	
			8,94	
C		TG1	20,75 °C	Sem perturbação
			25,75 °C	
			30,75 °C	

As condições iniciais das variáveis são as mesmas da tabela 26 de condições estacionárias.

III . 3 . RESULTADOS

A partir das proposições de ensaios com lógica *nebulosa*, foi obtido o comportamento do processo, ilustrado ns figuras 84 131 do anexo VI.5., com as respectivas estratégias de controle, conforme mostrado na tabela 30.

Tabela 30 . Comportamento do processo com diferentes proposições de ensaios.

PROPOSIÇÃO DE ENSAIOS	COMPORTAMENTO DO PROCESSO
Quanto a funções de Pertinência	Anexo VI.5.1.
Quanto à Base de Regras *	Anexo VI.5.2.
Quanto aos valores de “set-point”	Anexo VI.5.3.

Os comportamentos dinâmicos das variáveis de processo e as de controle estão mostrados nestas figuras e os valores médios das variáveis TG1 e COP e de seus desvios com relação à referência (módulo dos erros) em cada caso são dados nas tabelas a seguir, respectivamente.

Tabela 31 . Valores médios de TG1 e COP para os ensaios sob controle *nebuloso* com diferentes funções de pertinência e com a mesma base de regras (C . REG).

CONDIÇÕES		FUNÇÕES DE PERTINÊNCIA					
DE		Tabela 23		Tabela 24		Tabela 25	
PERTURBAÇÃO		COP _{med}	TG1 _{med}	COP _{med}	TG1 _{med}	COP _{med}	TG1 _{med}
q _o	+3.500 kJ/h	6,56	29,71	5,83	27,63	5,43	26,15
	-3.500 kJ/h	7,73	22,59	8,60	24,27	9,27	25,53
q _o	+3.500 kJ/h	5,97*	30,76*	5,55*	27,90*	5,32*	26,16*
	-3.500 kJ/h	8,19*	21,59*	8,96*	24,08*	9,42*	25,52*

* Médias integradas nos últimos 200 s de simulação (tempo total de simulação = 600 s).

Tabela 32 . Valores médios do Módulo do erro de TG1 e do COP para os ensaios sob controle *nebuloso* com diferentes funções de pertinência e a mesma bases de regras (C . REG).

CONDIÇÕES		FUNÇÕES DE PERTINÊNCIA					
DE		Tabela 23		Tabela 24		Tabela 25	
PERTURBAÇÃO		COP _{med}	TG1 _{med}	COP _{med}	TG1 _{med}	COP _{med}	TG1 _{med}
q _o	+3.500 kJ/h	0,67	3,98	1,07	1,89	1,50	0,40
	-3.500 kJ/h	0,89	3,18	1,72	1,49	2,37	0,22
q _o	+3.500 kJ/h	0,97*	5,26*	1,41*	2,26*	1,67*	0,43*
	-3.500 kJ/h	1,36*	4,15*	2,16*	1,76*	2,63*	0,24*

* Médias integradas nos últimos 200 s de simulação (tempo total de simulação = 600 s).

Tabela 33 . Valores médios de TG1 e COP para os ensaios sob controle *nebuloso* com diferentes bases de regras com as funções de pertinência sigmóide / triangular (Tabela 25).

CONDIÇÕES		BASE DE REGRAS									
DE		A		B		C		D		E	
PERTURBAÇÃO		COP _{med}	TG1 _{med}	COP _{med}	TG1 _{med}	COP _{med}	TG1 _{med}	COP _{med}	TG1 _{med}	COP _{med}	TG1 _{med}
q _o	+3.500 kJ/h	8,63	32,35	8,38	32,52	5,43	26,15	7,75	30,68	6,51	29,11
	-3.500 kJ/h	6,24	20,21	6,61	20,76	9,27	25,53	6,65	21,90	7,91	23,34
q _o	+3.500 kJ/h	10,30*	37,22*	8,20*	36,54*	5,32*	26,16*	8,74*	33,90*	6,71*	31,03*
	-3.500 kJ/h	5,59*	16,36*	6,22*	17,15*	9,42*	25,52*	6,21*	19,61*	8,01*	22,19*

* Médias integradas nos últimos 200 s de simulação (tempo total de simulação = 600 s).

Tabela 34 . Valores médios do Módulo do erro de TG1 e do COP para os ensaios sob controle *nebuloso* com diferentes bases de regras e com as funções de pertinência sigmoide / triangular (Tabela 25).

CONDICÕES		BASE DE REGRAS									
DE	PERTURBAÇÃO	A		B		C		D		E	
		COP _{med}	TG1 _{med}	COP _{med}	TG1 _{med}	COP _{med}	TG1 _{med}	COP _{med}	TG1 _{med}	COP _{med}	TG1 _{med}
q _o	+3.500 kJ/h	1,74	6,59	1,73	6,78	0,40	1,48	0,93	4,93	0,44	3,37
	-3.500 kJ/h	0,74	5,54	0,91	4,99	2,39	0,22	0,41	3,86	1,02	2,41
q _o	+3.500 kJ/h	3,52*	11,91*	1,48*	11,25*	1,65*	0,43*	1,90*	8,46*	0,35*	5,50*
	-3.500 kJ/h	1,36*	9,76*	0,96*	8,58*	2,66*	0,24*	0,71*	6,40*	1,18*	3,72*

* Médias integradas nos últimos 200 s de simulação (tempo total de simulação = 600 s).

Tabela 35 . Valores médios de TG1 e COP para os ensaios sob controle *nebuloso* com a base de regras “B” e com as funções de pertinência sigmoide / triangular (Tabela 25), em diferentes “set-point”.

CONDICÕES		Valores de “set-point” de C.O.P.					
DE	PERTURBAÇÃO	4,94		6,94		8,94	
		COP _{med}	TG1 _{med}	COP _{med}	TG1 _{med}	COP _{med}	TG1 _{med}
q _o	+3.500 kJ/h	5,66	27,87	8,38	32,52	10,09	33,74
	Sem Pertur.	5,62	23,01			8,16	27,37
q _o	+3.500 kJ/h	5,60*	29,19*	8,20*	36,54*	12,82*	39,24*
	Sem Pertur.	5,58*	21,56*			8,24*	28,45*

* Médias integradas nos últimos 200 s de simulação (tempo total de simulação = 600 s).

Tabela 36 . Valores médios do Módulo do erro de TG1 e do COP para os ensaios sob controle *nebuloso* na base de regras “B” e com as funções de pertinência sigmoide / triangular (Tabela 25), em diferentes “set-point” .

CONDICÕES		Valores de “set-point” de C.O.P.					
DE	PERTURBAÇÃO	4,94		6,94		8,94	
		COP _{med}	TG1 _{med}	COP _{med}	TG1 _{med}	COP _{med}	TG1 _{med}
q _o	+3.500 kJ/h	0,75	2,12	1,73	6,78	2,23	7,99
	Sem Pertur.	0,76	2,74			1,26	1,62
q _o	+3.500 kJ/h	0,74*	3,58*	1,48*	11,25*	4,08*	14,03*
	Sem Pertur.	0,76*	4,37*			1,13*	2,81*

* Médias integradas nos últimos 200 s de simulação (tempo total de simulação = 600 s).

Tabela 37 . Valores médios de TG1 e COP para os ensaios sob controle *nebuloso* na base de regras “C” com as funções de pertinência sigmoide / triangular (Tabela 25), em diferentes “set-point”.

CONDIÇÕES		Valores de “set-point” de TG1					
DE		20,75		25,75		30,75	
PERTURBAÇÃO		COP _{med}	TG1 _{med}	COP _{med}	TG1 _{med}	COP _{med}	TG1 _{med}
q _o	+3.500 kJ/h	4,52	22,48	5,43	26,15	7,33	30,65
	Sem Pertur.	5,66	21,54			9,49	30,24
q _o	+3.500 kJ/h	4,69*	21,16*	5,32*	26,16*	6,07*	31,16*
	Sem Pertur.	6,06*	20,84*			8,04*	30,84*

* Médias integradas nos últimos 200 s de simulação (tempo total de simulação = 600 s).

Tabela 38 . Valores médios do Módulo do erro de TG1 e do COP para os ensaios sob controle *nebuloso* na base de regras “C” e com as funções de pertinência sigmoide / triangular (Tabela 25), em diferentes “set-point” .

CONDIÇÕES		Valores de “set-point” de TG1					
DE		20,75		25,75		30,75	
PERTURBAÇÃO		COP _{med}	TG1 _{med}	COP _{med}	TG1 _{med}	COP _{med}	TG1 _{med}
q _o	+3.500 kJ/h	2,40	1,72	1,48	0,40	1,75	0,78
	Sem Pertur.	1,25	0,76			2,63	0,64
q _o	+3.500 kJ/h	2,31*	0,43*	1,65*	0,43*	0,85*	0,43*
	Sem Pertur.	0,88*	0,09*			1,20	0,09*

* Médias integradas nos últimos 200 s de simulação (tempo total de simulação = 600 s).

III . 4 . ANÁLISE DOS RESULTADOS

A análise dos resultados das diferentes proposições de ensaios é realizada avaliando as variáveis de processo TG1 e COP, as quais qualificam o processo quanto à temperatura de retorno do líquido e o índice de eficiência energética do processo, respectivamente, a fim de verificar o desempenho das estratégias de controle.

Denomina-se erro da variável a diferença entre o valor atual da variável e seu valor de *set-point* (valor de referência para o controle), significando o desvio ocorrido da variável com relação ao valor pretendido.

Os resultados qualitativos [os históricos das variáveis e dos históricos das diferenças das variáveis (diferença entre o valor instantâneo atual e o valor inicial ou condição estacionária)] são mostrados nas figuras do anexo VI.5., e os resultados quantitativos, resumo destas simulações, são mostrados nas tabelas 31 a 38, conforme proposições de ensaios, levando às seguintes análises :

1) Quanto às diferentes funções de pertinência das variáveis com a mesma base de regras.

A base de regras utilizada (C . REG) possui apenas uma variável de processo (TG1) e uma variável de controle (m_{ref}). Com esta base de conhecimento, pode-se verificar o comportamento da estratégia de controle *nebuloso* sobre a correção do desvio de TG1 com relação ao valor fixado de seu "*set-point*".

Os efeitos de TG1 sob perturbações de q_o de + 3.500 kJ/h e - 3.500 kJ/h e as correções para o valor de "*set-point*" de 25,75 °C através da atuação da variável de controle m_{ref} a diferentes funções de pertinência, utilizadas na estratégia de controle são mostrados nas figuras 132 a 135 do anexo VI.6.1. de forma comparativa, tanto para TG1 como para COP.

Verifica-se que as funções de pertinência que melhor se adequam ao controle da variável TG1, são as do tipo sigmóide/triangular (tabela 25), comparados com as do tipo triangular (Tabelas 23 e 24), uma vez que a correção do processo ocorreu em tempo menor, reduzindo o erro da variável TG1, conforme verificado especificamente entre as figuras 85, 89 e 93, também mostrados pelos valores de TG1_{médio} (no tempo total de simulação e nos últimos 200 s), verificados na tabela 31, na qual são observados erros de TG1 de 0,4 e 0,2 °C com relação ao "*set-point*", ou então pelas médias dos módulos dos erros, mostrados na tabela 32.

Entretanto, a variável de processo COP, que não estava sendo observada para o seu controle, possuiu um comportamento similar a TG1, quanto a sua velocidade de alteração, porém com um erro maior, também verificado pela sua média do módulo do erro, mostrado na tabela 32.

2) Quanto a diferentes Bases de Regras com as mesmas funções de pertinência.

Segundo a tabela 20, as diferentes bases de regras possuem quantidade de variáveis (de controle e de processo) já definidas. As diversas ações e atuações no mesmo processo mostram a

eficiência das estratégias de controle com cada base de regras, a fim de que se possa avaliar a necessidade de um número de variáveis monitoradas do processo e de controle.

Realizados os ensaios da proposição da tabela 28, foram comparados os comportamentos das variáveis TG1 e COP, conforme mostrados nas figuras 136 a 139 do anexo VI.6.2., e quantificados nas tabelas 33 e 34.

Verifica-se que as melhores bases de regras para o controle de TG1 foi o "C . REG" (figuras 136 e 137) e para o COP foi o "E . REG" (figuras 138 e 139), uma vez que seus valores médios se mantiveram próximos a seus valores de *referência*, conforme as tabelas 35 a 38.

A base de regra "C . REG" utilizada no controle do processo para a manutenção de TG1, próximo a seu "*set-point*", mostrou-se mais adequada mesmo possuindo apenas uma variável de processo e uma variável de controle como atuação direta. Aparentemente, o controle localizado mostrou-se melhor em comparação a outras bases de regras que possuem um maior número de entradas de informação do processo como também de atuação. Entretanto, como a parametrização das funções de pertinência das variáveis de atuação foram as mesmas em todos os ensaios, pode ter ocorrido super-valorização das implicações dos "conseqüentes", já que a desnebulização trata os valores nebulizados, segundo o Centro de Gravidade, de forma *bidimensional* e indiscriminada quanto as faixas pré configuradas.

No caso do controle do processo pela variável COP, a melhor base de regra foi o "E.REG", tendo em vista que houve um maior número de informações de entrada no controlador como também nas atuações de saída.

Comparando os programas de bases de regras "B . REG" e "E . REG", verifica-se que a maior quantidade de informações de entrada no controlador (quantidade de variáveis de processo) enriquece a desnebulização, já que em ambos os casos tem-se o mesmo número de variáveis de controle.

Nota-se nas figuras 138 e 139 do anexo VI.6.2., que os comportamentos do COP em todos os ensaios mostraram oscilações em seus valores, uma vez que esta variável é calculada a partir dos valores de outras (ex.: $\dot{m}_{ref}$, $\dot{m}_{glic}$) em que há as respectivas alterações quando da atuação.

Verifica-se também que um menor número de variáveis de processo, com um menor número de implicações na base de regras, proporciona uma maior oscilação ou um menor amortecimento nos valores das variáveis de processo, tendo em vista que um menor quantidade de valores a ser desnebulizados possibilita resultados oscilantes.

3) Quanto a diferentes valores de “*set-point*” com as mesmas base de regras e funções de pertinência.

A proposição dos ensaios, mostrada na tabela 29, objetiva a avaliação do desempenho do controle para diferentes valores de “*set-point*”, tanto para TG1 como para o COP.

O comportamento destas variáveis sob controle com as funções de pertinência da tabela 25 e com a base de regras “C . REG” para TG1 e com a base de regras “B . REG” para o COP, é mostrado nas figuras 140 a 143 do anexo VI.6.3.

Verifica-se, para o caso de controle de TG1, que a estratégia utilizada atua na correção do valor da variável ao valor de seu “*set-point*”, sem provocar o *over-shoot* e a estabilização com baixo erro. Os valores médios da variável estábilizada são mostrados na tabela 37 pelos últimos 200 segundos de simulação, tanto o processo sem perturbação como sob perturbação em degrau de + 3.500 kJ/h de q_o .

Os baixos desvios de $TG1_{mod}$ ao seu valor de “*set-point*” encontrados nas simulações do processo controlado com as diferentes opções de “*set-point*” são de + 0,31 °C, quando tem-se perturbação de 3.500 kJ/h de q_o e de +0,1 °C para sem perturbação, verificados na tabela 37, ou então possuem uma média do erro absoluto de 0,43 °C com perturbação e 0,09 °C sem perturbação, conforme tabela 38.

Assim, confirmada a adequação da estratégia de controle, tanto das funções de pertinência como a base de regras, para o controle de um processo, as alterações de “*set-point*” não afetariam o bom desempenho do ajuste do processo às novas condições de operação.

Para o caso de controle de COP, verifica-se que houve oscilações no comportamento desta variável, conforme mostrado na figura 4 do anexo VI.6.3, porém seus valores médios não possuem grandes desvios, como por exemplo : * para “*set-point*” do C.O.P. de 4,94 tem-se erro de + 14,6 %; * para “*set-point*” do C.O.P. de 6,94 tem-se erro de + 20,7 % ; * para “*set-point*” do C.O.P. de 8,94 tem-se erro de + 12,8 % .

Verifica-se que nos ensaios onde está sendo controlado apenas o valor de COP, a variável TG1 possui um comportamento crescente ou decrescente com o tempo sem perspectivas de estabilização, uma vez que não está sendo observada pelo controlador.

III. 5. CONCLUSÕES

O melhor desempenho do controle *nebuloso* sobre o sistema de refrigeração para resfriamento de líquido foi obtido com :

Funções de pertinência mais sensíveis aos erros dos valores das variáveis com relação ao "set-point". Para o exemplo ensaiado, as funções de pertinência da tabela 25 (tipos sigmoide e triangular) que possuem mesma faixa de utilização de variáveis, proporcionou erros da ordem de 0,2 a 0,4°C ao valor do "set-point".

As bases de regras que melhor se adequaram no controle de uma variável de processo específica foram as que possuem linhas de comando com apenas a variável em questão nos antecedentes. Porém a base de regra que possui maior número de conseqüentes para desnebulização atenderia melhor com diferentes atuações das variáveis de controle com funções de pertinência mais adequadas.

A mudança de "set-point" não alterou o desempenho para o controle *nebuloso* com a base de regra e funções de pertinência já aprovadas em outros testes.

O controle *nebuloso* possui rapidez na atuação do processo evitando sobre-elevação das variáveis de processo.

A estratégia de controle através da lógica *nebulosa* considera as influências de diferentes variáveis de processo sobre uma ou mais atuações das variáveis de controle, com os devidos pesos de importância, possibilitando um controle global do processo e não apenas um controle localizado.

Quanto à aplicação da lógica *nebulosa*, a obtenção de resultados da simulação sob controle viabilizaram a decisão de implementação de um micro controlador *nebuloso* em outros sistemas frigoríficos a baixo custo, proporcionando um melhor desempenho para diversas aplicações de refrigeração em substituição aos atuais controles eletro-mecânicos convencionais.

CAPÍTULO IV . COMPARAÇÃO DO CONTROLE *NEBULOSO* E CONVENCIONAL

IV . 1 . INTRODUÇÃO

A proposta da comparação das estratégia de controle do sistema de refrigeração para o resfriamento de líquido advém de que estes sistemas possuem atualmente apenas controles “primários” (proporcional e “on-off”).

Autores como SINGH & OU-YANG (1994) apresentam argumentos que favorecem o controle *nebuloso* com relação a outros tipos de controles. Eles o consideram melhor, o mais fácil e o mais confiável, principalmente para sistemas não lineares.

SHIEH et al. (1992) são mais enfáticos em afirmar que o controle *nebuloso* é comparável ao P.I.D. e melhor que o P.I., ainda considerando ser o de mais fácil implementação.

Frente a alguns exemplos de aplicação de controle *nebuloso* em diferentes processos expostos em literatura, propôs-se atualizar a lógica de controle para os sistemas de refrigeração, comparando seu comportamento com relação ao controle “on-off”.

IV . 2 . MATERIAIS E MÉTODOS.

Em um mesmo sistema de refrigeração para resfriamento de líquido foram realizados ensaios simulados de diferentes lógicas de controle *nebuloso* e “on-off”, a fim de compará-las entre si.

A lógica de controle “on-off” está embutida no próprio programa simulador, havendo a possibilidade de opções quanto a banda de controle ($\Delta TG1$) e quanto ao número de iterações do ciclo do processo para habilitar esta rotina de controle.

Utilizando o simulador dinâmico desenvolvido com aplicações de controles *nebuloso* e “on-off”, foram propostos diferentes ensaios com perturbações em degrau da carga térmica (q_0), agora para o controle “on-off”.

As simulações com o controle “on-off” iniciaram com as condições das variáveis da tabela 26 e optou-se pela banda morta (erro ou desvio aceitável para ocorrer atuações) de TG1 de 0,5 , 1,0 e 2,0 °C, a fim de que fosse competitivo frente a lógica *nebulosa*.

A proposição de ensaios com as respectivas perturbações de q_0 e as possíveis bandas de TG1 está mostrada na tabela 39.

Tabela 39 . Proposição de ensaios com controle “on-off” a diferentes “set-point” de TG1, utilizando perturbações em degrau de q_o de 3.500 kJ/h e diferentes bandas morta de TG1.

Perturbação de q_o	Banda morta de TG1	Set_point_TG1
3.500 kJ/h	0,5 °C	20,75, 25,75 e 30,75 °C
	1,0 °C	20,75, 25,75 e 30,75 °C
	2,0 °C	20,75, 25,75 e 30,75 °C

Outras lógicas de controle, tais como PID, PI ou adaptativo, não foram testadas neste sistema de refrigeração para resfriamento de líquido, uma vez que estas não são utilizadas atualmente no controle deste processo. Entretanto, em futuros trabalhos, a comparação destas lógicas de controle com a lógica testada (lógica nebulosa) será valiosa para definição e implementação em processos reais, porém não é o escopo deste trabalho.

IV . 3 . RESULTADOS

Realizando os ensaios propostos na tabela 39, foram obtidos os resultados do comportamento das variáveis (de processo e de controle), conforme históricos dos valores das variáveis e dos valores das suas diferenças com seus valores iniciais, mostrados nas figuras 144 a 161 do anexo VI.7.

As médias integradas dos valores das variáveis e os módulos dos erros de TG1 e do COP de cada ensaio proposto para o controle “on-off” estão mostradas nas tabelas 40 e 41, respectivamente. Observa-se que o cálculo da média do COP foi realizado com o sistema em funcionamento, uma vez que o COP é nulo quando o processo está desligado ou então com $\dot{m}_{ref}$ nula.

Uma comparação gráfica do comportamento das variáveis de processo sob controle “on-off” para diferentes “set-point”, conforme proposição de ensaios, é mostrada nas figuras 162 a 167 do anexo VI.8. .

Comparações gráficas entre o controle nebuloso e “on-off”, a partir de um mesmo cenário (condições iniciais, perturbação de + 3.500 kJ/h de q_o , mesma variável de processo monitorada e mesma variável de controle para atuação) são mostradas nas figuras 168 a 175 do anexo VI.9. .

Tabela 40 . Valores médios de TG1 e COP para controle “on-off” com perturbação em degrau de + 3.500 kJ/h de q_o para diferentes bandas morta ($\Delta TG1$) e a diferentes “set-point” de TG1.

$\Delta TG1$	set-point_TG1	COP _{med} **		TG1 _{med}	
0,5	30,75	4,97	4,81*	30,78	31,02*
	25,75	4,52	4,27*	26,10	26,13*
	20,75	4,06	3,84*	22,26	21,00*
1,0	30,75	5,00	4,84*	30,91	31,20*
	25,75	4,63	4,29*	26,10	26,22*
	20,75	4,06	3,85*	22,28	21,26*
2,0	30,75	5,02	4,95*	31,15	32,15*
	25,75	4,88	4,32*	26,34	26,67*
	20,75	4,07	3,94*	22,39	21,95*

* Médias integradas nos últimos 200 s de simulação.
 ** Média com sistema em funcionamento.

Tabela 41 . Valores médios do Módulo do erro de TG1 e do COP para controle “on-off” com perturbação em degrau de + 3.500 kJ/h de q_o para diferentes bandas morta ($\Delta TG1$) e a diferentes “set-point” de TG1.

$\Delta TG1$	set-point_TG1	COP _{med} **		TG1 _{med}	
0,5	30,75	3,02	3,15*	0,80	0,45*
	25,75	3,00	3,18*	0,50*	0,53*
	20,75	3,06	3,60*	1,58	0,45*
1,0	30,75	2,74	2,63*	1,08	0,85*
	25,75	2,87	3,59*	0,73	0,85*
	20,75	3,12	3,58*	1,74	0,91*
2,0	30,75	2,73	2,16*	1,54	1,55*
	25,75	2,42	2,70*	1,15	1,29*
	20,75	3,11	3,89*	2,08	1,80*

* Médias integradas nos últimos 200 s de simulação.
 ** Média com sistema em funcionamento.

IV . 4 . ANÁLISES DOS RESULTADOS

A) Analisando o processo controlado pela lógica “on-off”, verifica-se que :

A.i.) Quanto menor a banda morta de $\Delta TG1$ melhor é o desempenho do controle do processo na manutenção do “set-point” da temperatura TG1 estipulado. Porém o COP, que não estava sendo monitorado para promover atuações de controle, possui comportamento inverso, ou seja, quanto maior a banda morta de $\Delta TG1$, maior seu valor, entretanto com pequenas diferenças entre si para esta comparação.

A.ii.) A mudança do set-point_TG1 para a mesma banda morta de controle ($\Delta TG1$) não promoveu desvios diferenciados na variável controlada. Os desvios foram da mesma ordem de grandeza, observados nos últimos 200 segundos de simulação.

Como exemplo, os desvios médios da temperatura média de TG1 com relação ao “set-point” estipulado estão mostrados na tabela 42.

Tabela 42 . Desvios da temperatura controlada com relação ao “set-point” especificado para cada banda morta de controle.

Banda morta de TG1 ($\Delta TG1$)	Desvios médios ($TG1_{med}^* - Set_point_TG1$)
0,5 °C	+ 0,30 °C
1,0 °C	+ 0,48 °C
2,0 °C	+ 1,17 °C

* Médias integradas nos últimos 200 segundos de simulação

Uma vez comparados os comportamentos do processo controlado com a lógica “on-off”, selecionou-se a estratégia com a menor banda morta (0,5 °C), a fim de compará-lo com o processo controlado com a lógica *nebulosa*.

A.iii.) Os ensaios realizados com o controle “on-off” não usaram as informações da variável de processo, o COP, sendo que as atuações da variável de controle (m_{ref}) foram dirigidas à correção do desvio da variável TG1.

Sabendo-se que o COP é calculado com as informações das linhas de corrente do etileno glicol, a mudança da banda morta de controle ($\Delta TG1$) não influenciou no resultado deste cálculo. Apenas a alteração do set-point_TG1 é a que mais afetou o valor do COP, devido a seu respectivo

cálculo ser favorecido pelo maior valor da temperatura deste fluido secundário (TG1). Esta mudança na temperatura de estabilização do etileno glicol proporcionou uma maior troca térmica no evaporador, devido a maior diferença de temperatura entre os fluidos. Isto é verificado pelas pequenas diferenças do COP entre os ensaios com mesmo “set-point” a diferentes bandas morta, devido especificamente ao valor médio de TG1 ser mantido pelo controle.

B) Analisando o controle “on-off” e *nebuloso* das variáveis de processo, verifica-se que:

B.i.) Os resultados obtidos no controle do processo com a lógica “on-off” (banda morta: $\Delta TG1 = 0,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$) e *nebulosa* (programa de regras : C . REG e funções de pertinência : Tabela 25), com as mesmas condições iniciais e a mesma perturbação estão mostrados na tabela 43.

Tabela 43 . Resultados de COP_{med} e $TG1_{med}$ para o processo controlado com lógicas “on-off” e *nebulosa* com perturbação de +3.500 kJ/h em degrau de q_0 .

TIPO DE CONTROLE	set-point_TG1	COP_{med}^{**}		$TG1_{med} [\text{ }^{\circ}\text{C}]$	
“ON-OFF” $\Delta TG1 = 0,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$	30,75	4,97	4,81*	30,78	31,02*
	25,75	4,52	4,27*	26,10	26,13*
	20,75	4,06	3,84*	22,26	21,00*
NEBULOSO C . REG / Tab. 25	30,75	7,33	6,07*	30,65	31,16*
	25,75	5,43	5,32*	26,15	26,16*
	20,75	4,52	4,69*	22,48	21,16*

* Médias integradas nos últimos 200 s de simulação.

** Média com sistema em funcionamento.

Estas simulações possuem as mesmas variáveis de processo (TG1), como informação ao controlador, e as mesmas variáveis de controle (m_{ref}) com atuação do processo.

Uma vez que o cenário é o mesmo, apenas diferenciado pelas lógicas de controle, verifica-se que :

B.i.1) Os desvios da temperatura média do etileno glicol ($TG1_{med}$) com o “set-point” correspondente ao ensaio, tanto para lógica de controle “on-off” como para a *nebulosa*, são de mesma grandeza. Estes desvios são mostrados na tabela 44.

Tabela 44. Desvios da temperatura média do etileno glicol ($TG1_{med}$) com o “set-point” para os controles “on-off” e *nebuloso*.

TIPO DE CONTROLE	set-point_TG1	Desvios ($TG1_{med}^* - Set_point_TG1$)
“ON-OFF” $\Delta TG1 = 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$	30,75	0,27 °C
	25,75	0,38 °C
	20,75	0,25 °C
NEBULOSO C . REG / Tab. 25	30,75	0,41 °C
	25,75	0,41 °C
	20,75	0,41 °C

* Médias integradas nos últimos 200 s de simulação.

Nota-se que o controle “on-off” foi melhor que o controle *nebuloso* comparando os desvios de forma absoluta, entretanto as diferenças entre eles são muito pequenas.

Verifica-se, ainda, que os desvios da temperatura TG1 com o “set-point” para o controle *nebuloso* foram de mesmo valor. Esta igualdade não é coincidência, mas uma estabilidade do “erro” que pode ser reduzido, conforme configuração inicial das funções de pertinência. Isto significa que poder-se-ia ter desvio nulo com uma pequena alteração na parametrização das funções de pertinência (sigmoide/triangular).

B.i.2) Os COPs mantiveram a tendência de que quanto maior o “set-point” maior o COP, em virtude do seu cálculo envolver as condições da linha de corrente do etileno glicol, ou seja, isto está relacionado ao fato de maiores valores de TG1 implicarem em maiores temperaturas de evaporação, e portanto em maiores COP,, conforme verificado na tabela 45.

B.i.3) Os COPs do processo controlado com lógica *nebulosa* foram significativamente maiores que os controlados com a lógica “on-off” a diferentes “set-points”, conforme visto na tabela comparativa, tabela 45.

Nota-se que o COP do processo controlado com lógica *nebulosa* é em média de 24,30 % maior que o COP do processo controlado com lógica “on-off”. Mesmo não sendo variável de processo ou variável monitorada para influenciar na atuação do controlador.

Observa-se , ainda, que estes ensaios foram realizados controlando apenas a variável de processo (TG1) através da atuação da variável de controle , m_{ref} .

Tendo em vista que o coeficiente de eficácia (COP) do sistema de refrigeração indica a

relação entre o calor trocado no evaporador (calculado pela variação de entalpia da solução de etileno glicol) e a energia útil introduzida no sistema pelo compressor (calculado pela diferença entre as trocas de energia no evaporador e no condensador, que por sua vez a energia dissipada no condensador é calculada pela variação de entalpia da água de resfriamento), baseado na primeira lei da termodinâmica, é possível relacioná-lo ao consumo de energia num determinado período.

Para uma mesma carga térmica, quanto maior o COP menor será o consumo de energia, mantendo-se constantes as eficiências de conversão de energia no compressor assim como a eficiência volumétrica. Em função desta relação (entre o COP e consumo de energia), apenas a avaliação do coeficiente de eficácia torna-se suficiente e generalizada para qualquer tempo superior ao tempo de 600 segundos (tempo de simulação dos ensaios) para um mesmo cenário de aplicação, uma vez que o comportamento das variáveis torna-se cíclico ou periódico após este tempo de simulação, conforme mostrado nas figuras 168 a 175 do anexo VI.9.

Tabela 45 . Comparação dos valores de COP para o processo controlado com lógica *nebulosa* e “on-off” a diferentes “set-points”.

Set-point_TG1	COP _{med} **		Diferença	Diferença Percentual [%]
	NEBULO SO	“ON- OFF”	(COP _{FZ} - COP _{on-off})	(COP _{FZ} - COP _{on-off}) / COP _{on-off}
30,75	6,07	4,81	1,26	+ 26,19
25,75	5,32	4,27	1,05	+ 24,59
20,75	4,69	3,84	0,85	+ 22,14

* Médias integradas nos últimos 200 s de simulação.

** Média com sistema em funcionamento.

B.ii.) Fixando-se uma única condição de ensaio (Set-point_TG1 = 25,75 °C ; perturbação em grau de + 3.500 kJ/h de q_o e condições iniciais da tabela 26), a comparação dos resultados dos controles do processo com diferentes lógicas de controle é dada na tabela 46.

Nestes ensaios, os valores de COP_{med} para o controle *nebuloso* foram muito superiores ao “on-off”, entretanto as temperaturas TG1 foram maiores. Isto se deve a desnebulização que desfavoreceu o controle de TG1, uma vez que as regras e as funções de pertinência poderiam ser melhoradas para favorecer igualmente as variáveis em enfoque.

Os altos valores dos COPs obtidos em alguns ensaios se deve ao fato de que o sistema não estava sendo controlado adequadamente, uma vez que a temperatura TG1 resultava crescente, pro-

movendo uma troca térmica no evaporador cada vez maior em relação a energia introduzida no sistema para efetivação da vazão mássica de refrigerante necessária para a correção do erro de TG1.

Tabela 46 : Resultados de TG1_{med} e COP_{med} do processo a diferentes lógicas de controle a partir de uma condição inicial (Tabela 26), set-point_TG1 = 25,75 °C e perturbação de + 3.500 kJ/h em degrau de q_o.

	TIPOS DE CONTROLE					
	“ON-OFF” ΔTG1= 0,5 °C	NEBULOSO (Funções de Pertinência : Tab. 20)				
		A	B	C	D	E
COP _{med}	4,27	10,30	8,20	5,32	8,74	6,71
TG1 _{med}	26,13	37,22	36,54	26,16	33,90	31,03

* Médias integradas nos últimos 200 s de simulação.

C) As médias integradas do módulo do erro das variáveis consideradas para comparação do controle *nebuloso* e “*on-off*” estão mostradas na tabela 47.

Optou-se por mostrar a média integrada ($\frac{1}{\Theta} \cdot \int_0^{\Theta} [Abs(X(\Theta) - Set_point(X))] \cdot d\Theta$) do erro absoluto, a fim de parametrizar as comparações entre os diferentes processos controlados e simulados, assim como eliminar resultados de erros que poderiam ser compensados com valores acima ou abaixo do valor de “*set-point*”.

Tabela 47. Valores da média do erro absoluto de TG1 e COP para os processos perturbado com + 3.500 kJ/h para diferentes lógicas de controle.

TIPO DE CONTROLE	Set-point_TG1					
	20,75		25,75		30,75	
	TG1	COP**	TG1	COP**	TG1	COP**
“ON-OFF” ΔTG1 = 0,5 °C	1,58	3,06	0,50	3,00	0,80	3,02
	0,45*	3,60*	0,53*	3,18*	0,45*	3,15*
NEBULOSO C . REG / Tab.25	1,72	2,40	0,40	1,48	0,78	1,75
	0,43*	2,31*	0,43*	1,65*	0,43*	0,85*

* Médias integrada nos últimos 200 s de simulação.

** Média com sistema em funcionamento.

Observa-se, ainda, que os valores de “*set-point*” das variáveis estão mostradas na tabela 26, também consideradas como condições iniciais e de regime estacionário. Para os ensaios com mudanças de “*set-point*” tanto de TG1 como do COP, foram atribuídas uma margem de $\pm 5,0$ °C e $\pm 2,0$, respectivamente.

Esta comparação indica que o controle *nebuloso* mostrou-se mais eficiente que o controle “*on-off*”, uma vez que as médias dos erros absolutos foram menores tanto para a variável TG1 como para o COP. Observa-se, ainda, que a ordem de grandeza dos erros de TG1 foi a mesma para ambos controles, entretanto as médias dos erros de COP foram bem menores para o controle *nebuloso*.

Nota-se que as médias dos módulos dos erros da variável controlada (TG1) nos processos controlados com lógica *nebulosa* obtiveram o mesmo valor de TG1, o que confirma a justificativa dada no item anterior, B.i.1. , referente à parametrização das funções de pertinência.

IV. 5. CONCLUSÕES

A) Quanto ao comportamento do processo com controle “on-off”, pode-se afirmar :

As diferenças entre os valores de COP dos processos controlados com bandas morta diferentes para o mesmo valor de “set-point” são muito baixos, da ordem de 0,02 a 0,11.

As diferenças entre os valores da temperatura de retorno do etileno glicol (TG1) nos processos controlados com bandas morta diferentes para o mesmo valor de “set-point” são baixos, da ordem de 0,1 a 1,0 °C .

Quanto menor a banda morta de TG1 ($\Delta TG1$), menor a diferença entre $TG1_{med}$ e o valor de set-point_TG1, assim como a menor média integrada deste erro absoluto.

Os valores de COP foram maiores para os valores de set-point_TG1 superiores.

B) Quanto a comparação do comportamento do processo com os controles *nebuloso* e “on-off” nas mesmas condições de operação e perturbação, utilizando a mesma e única variável de processo (TG1) e de controle [vazão mássica de refrigerante ($\dot{m}_{ref}$)]:

Os desvios da variável TG1 em relação ao seu “set-point” foram de mesma ordem de grandeza para quaisquer dos valores de “set-point” fixado, entretanto o controle *nebuloso* possui menor média do erro absoluto desta variável com relação ao “on-off”.

O valor do COP do processo controlado com lógica *nebulosa* é 24,30 % maior que o C.O.P. do processo controlado com lógica “on-off”, com as mesmas variáveis de processo (TG1) e de controle ($\dot{m}_{ref}$) mesmo o COP não sendo a variável controlada.

A parametrização das funções de pertinência não foi a melhor, tendo em vista que as médias dos módulos dos erros se mantiveram semelhantes, independentemente do valor do “set-point”, sendo que poderiam ser minimizadas, aproximando-se do erro nulo.

O controle *nebuloso* proporciona menor média do módulo do erro tanto para a variável controlada (TG1) quanto, principalmente, para o C.O.P. do processo.

O controle *nebuloso* atua na correção do desvio da variável de processo com relação a seu “set-point” de forma moderada (com aceleração ou desaceleração) e ajustável, não provocando overshoot ou oscilações, se comparado com o controle “on-off”.

IV . 6 . SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

- Validação do modelo matemático proposto com o protótipo experimental , em regime transiente;
- Experimentação do processo controlado;
- Avaliação energética do mesmo modelo com os respectivos parâmetros para diferentes refrigerante a serem utilizados (R-22 , R-502 , R-134 e R-717);
- Avaliação do comportamento do processo pela substituição da lógica de controle (PID , P, adaptativo e outros) em diferentes variáveis de controle;
- Implementação em sistemas de maior porte.
- Implementação das propriedades do óleo lubrificante nas condições de estado da mistura do fluido refrigerante.
- Atualização do software para o ambiente Windows.
- Implementação de coeficientes de troca de calor variáveis, calculados por correlações de Nusselt.
- Consideração da velocidade de variação das variáveis de processo sob perturbação na base de conhecimento, para o caso de controle com lógica nebulosa.
- Implementação no modelo matemático dinâmico a influência fluido-dinâmica nos equipamentos do processo.
- Implementação de características reais de compressores relacionadas à eficiência volumétrica.

V. BIBLIOGRAFIA

- 1) *The logic that dares not speak its name, *The economist*, 16 th , 101-103, April 1994.
- 2) ARBEX, R. T. Controle *fuzzy* : conceitos e aplicações . *Instec - Instrumentação e Controle de Processos* , nº 78 , 18-30 , junho 1994.
- 3) BARCELLOS, K. M. . Modelisation d'une pompe a chaleur a capteurs atmospheriques. Application au sechage du grain . Tese de doutorado, Toulouse, França , 1990.
- 4) BOX, G. E. P.; HUNTER, W. G. , HUNTER J. S. *Statistics for experimenters*, Ed. John Wiley & Sons, New York, 1978.
- 5) BREDAS SMITH, M. van. Aspects of energy minimization in water chiller systems, *Frigair* 86, Petroria, ZA., 1, nº 7, 14-16, 1986.
- 6) CASCIA, M.A. Optimizing chiller plant energy savings using adaptive direct digital controller algorithms, *ASHRAE Trans.*, US., 94, part 2, 1937-1946, 1988.
- 7) CECCHINI, C. & MARSHAL, D. Model of compression refrigerating machine: application to the utilization of test results on heat pumps, *Proc. 17th int. Congr. Refrig.*, Vienna, AT., B/E, 24-29, 911-916 (B), 557-562 (E), 1987.
- 8) CHAPRA, S.C. & CANALE, R.P. - *Numerical methods for engineers* , 2a. Ed. , Mc. Graw Hill, 1989.
- 9) CLELAND A.C. Simulation of industrial plants under variable load conditions. *International Journal of Refrigeration* , vol. 6, nº 1, 11-19, jan., 1983.
- 10) CLELAND A.C. Experimental verification of a mathematical model for simulation of industrial refrigeration plants. *Rev. Int. Froid*, vol. 8, 275-282, September, 1985.
- 11) CLELAND, A.C. Computer subroutines for rapid evaluation of refrigerant thermodynamic properties, *Rev. Int. Froid/Int. J. Refrig.*, GB., 9, nº 6, 346-351, 1986.
- 12) CLELAND, A.C. Software for refrigeration plant design, *AIRAH J.*, AU., 41, nº 7, 40-42, 1987.
- 13) DOSSAT, R.J. *Princípios de Refrigeração* , Ed. Hemmus, 1985.
- 14) DU PONT COMPANY - *Strategy of Experimentation - Screening Designs*, 1988.
- 15) EERIKAINEN, T ; LINKO, S. & LINKO, P. The potential of *fuzzy logic* in optimization and control : *Fuzzy reasoning in extrusion cooker control* . *Automatic Control and optimization of food process*. Ed. Elsevier Applied Science, London, 183-200, 1988.

- 16) GREEN, R. K. et al, Performance of a heat pump utilizing capacity control, **Israel Conference on Mech. Eng.**, Haifa, 1980.
- 17) HYPROTECH - HYSIM : **User's guide** . versão 2.02 , Canada, may, 1993.
- 18) HYPROTECH - HYSIM : **Special features and applications guide**, Canada, versão 2.02 , may, 1993.
- 19) MARSHALL S.A. & JAMES, R.W., Dynamic analysis of an industrial refrigeration system to investigate capacity control . **Proc. Inst. Mech. Engrs.** , 189 , 44/75 , 437-445, 1975.
- 20) MELO, C. & LUNARDI, M. A. Dynamic behaviour of vapor compression refrigerator: a theoretical and experimental analysis . **Proc. 17th Int. Congr. Refrig**, Vienna, 141-149, 1988.
- 21) PARREIRA E., PEREIRA & PARISE J. A. DOS REIS, Performance analysis of capacity control devices for heat pump reciprocating compressors. **Proc. 1988 int. Compressor Eng. Conf.**, Purdue Univ., US., 2, 18-21, 505-510, 1988.
- 22) PLACKETT, R. L. & BURMAN, J. P. The design of optimum multi-factorial experiments, 305, 1944.
- 23) SHIEH, J. S.; CHEN, H. C. & FERNG. L. H. Application of a *fuzzy logic* controller in temperature control of a pilot high-temperature short-time heat exchanger. **Food Control**, vol.3, nº 2 , 91-96 , 1992.
- 24) SINGH, R.K. & OU-YANG, F. Knowledge - based *fuzzy* control of aseptic processing. **Food Technology** , vol. 48, nº 06 , 155-161, June 1994.
- 25) TECQUIPMENT. **Experiments in refrigeration using the refrigeration test bench TD-30** , Jun., 1973.
- 26) VARGAS, J. V. C. & PARISE, J. A. R. Simulação em regime transiente do controle em malha fechada de uma bomba de calor . **III Combrava** , São Paulo, 87-90 , Fev. , 1992.
- 27) ZADEH, L. A. *Fuzzy sets*. **Information and control** , vol. 8, nº 3, p.338-353, june 1965.
- 28) ZHANG, Q. & LITCHFIELD, J.B. *Fuzzy logic* control for a continuous crossflow grain dryer. **Journal of Food Process Engineering** , 16, 59-77, 1993.

VI . ANEXOS

3

4

VI. 1 . METODOLOGIA DE PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

VI. 1 . 1 . MÉTODOS DE PLACKETT-BURMAN PARA 36 ENSAIOS

Nº do Ensaio																			
Variáveis	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
X1	-	+	-	+	+	+	-	-	-	+	+	+	+	+	-	+	+	+	-
X2	+	-	+	+	+	-	-	-	+	+	+	+	+	-	+	+	+	-	-
X3	-	+	+	+	-	-	-	+	+	+	+	+	-	+	+	+	-	-	+
X4	+	+	+	-	-	-	+	+	+	+	+	-	+	+	+	-	-	+	-
X5	+	+	-	-	-	+	+	+	+	+	-	+	+	+	-	-	+	-	-
X6	+	-	-	-	+	+	+	+	+	-	+	+	+	-	-	+	-	-	-
X7	-	-	-	+	+	+	+	+	-	+	+	+	-	-	+	-	-	-	-
X8	-	-	+	+	+	+	+	-	+	+	+	-	-	+	-	-	-	-	+
X9	-	+	+	+	+	+	-	+	+	+	-	-	+	-	-	-	-	+	-
X10	+	+	+	+	+	-	+	+	+	-	-	+	-	-	-	-	+	-	+
X11	+	+	+	+	-	+	+	+	-	-	+	-	-	-	-	+	-	+	-
X12	+	+	+	-	+	+	+	-	+	-	-	-	-	-	+	-	+	-	+
X13	+	+	-	+	+	+	-	-	+	-	-	-	-	+	-	+	-	+	+
X14	+	-	+	+	+	-	-	+	-	-	-	-	+	-	+	-	+	+	-
X15	-	+	+	+	-	-	+	-	-	-	-	+	-	+	-	+	+	-	-
X16	+	+	+	-	-	+	-	-	-	-	+	-	+	-	+	+	-	-	+
X17	+	+	-	-	+	-	-	-	-	+	-	+	-	+	+	-	-	+	-
X18	+	-	-	+	-	-	-	-	+	-	+	+	+	-	-	+	-	-	-
X19	-	-	+	-	-	-	-	+	-	+	-	+	+	-	-	+	-	-	+
X20	-	+	-	-	-	-	+	-	+	-	+	+	-	-	+	-	-	+	-
X21	+	-	-	-	-	+	-	+	-	+	+	-	-	+	-	-	+	-	+
X22	-	-	-	-	+	-	+	-	+	+	-	+	+	-	-	+	-	+	+
X23	-	-	-	+	-	+	-	+	+	-	-	+	-	-	+	-	+	+	+
X24	-	-	+	-	+	-	+	+	-	-	+	-	-	+	-	+	+	+	-
X25	-	+	-	+	-	+	+	-	-	+	-	-	+	-	+	+	+	-	-
X26	+	-	+	-	+	+	-	-	+	-	-	+	-	+	+	+	-	-	-
X27	-	+	-	+	+	-	-	+	-	-	+	-	+	+	+	-	-	-	+
X28	+	-	+	+	-	-	+	-	-	+	-	+	+	+	-	-	-	+	+
X29	-	+	+	-	-	+	-	+	-	+	+	+	+	-	-	-	+	+	+
X30	+	+	-	-	+	-	-	+	-	+	+	+	-	-	-	+	+	+	+
X31	+	-	-	+	-	-	+	-	+	+	+	-	-	-	+	+	+	+	+
X32	-	-	+	-	-	+	-	+	+	+	-	-	-	+	+	+	+	+	-
X33	-	+	-	-	+	-	+	+	+	-	-	-	+	+	+	+	+	-	+
X34	+	-	-	+	-	+	+	+	-	-	-	+	+	+	+	+	-	+	+
X35	-	-	+	-	+	+	+	-	-	+	+	+	+	+	+	-	+	+	+

Continuação :

N ° de Ensaio																	
Variáveis	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
X1	-	+	-	-	-	-	+	-	+	-	+	+	-	-	+	-	-
X2	+	-	-	-	-	+	-	+	-	+	+	-	-	+	-	-	-
X3	-	-	-	-	+	-	+	-	+	+	-	-	+	-	-	+	-
X4	-	-	-	+	-	+	-	+	+	-	-	+	-	-	+	-	-
X5	-	-	+	-	+	-	+	+	-	-	+	-	-	+	-	+	-
X6	-	+	-	+	-	+	+	-	-	+	-	-	+	-	+	+	-
X7	+	-	+	-	+	+	-	-	+	-	-	+	-	+	+	+	-
X8	-	+	-	+	+	-	-	+	-	-	+	-	+	+	+	-	-
X9	+	-	+	+	-	-	+	-	-	+	-	+	+	+	-	-	-
X10	-	+	+	-	-	+	-	-	+	-	+	+	+	-	-	-	-
X11	+	+	-	-	+	-	-	+	-	+	+	+	-	-	-	+	-
X12	+	-	-	+	-	-	+	-	+	+	+	-	-	-	+	+	-
X13	-	-	+	-	-	+	-	+	+	+	-	-	-	+	+	+	-
X14	-	+	-	-	+	-	+	+	+	-	-	-	+	+	+	+	-
X15	+	-	-	+	-	+	+	+	-	-	-	+	+	+	+	+	-
X16	-	-	+	-	+	+	+	-	-	-	+	+	+	+	+	-	-
X17	-	+	-	+	+	+	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	-
X18	+	-	+	+	+	-	-	-	+	+	+	+	+	-	+	+	-
X19	-	+	+	+	-	-	-	+	+	+	+	+	-	+	+	+	-
X20	+	+	+	-	-	-	+	+	+	+	+	-	+	+	+	-	-
X21	+	+	-	-	-	+	+	+	+	+	-	+	+	+	-	-	-
X22	+	-	-	-	+	+	+	+	+	-	+	+	+	-	-	+	-
X23	-	-	-	+	+	+	+	+	-	+	+	+	-	-	+	-	-
X24	-	-	+	+	+	+	+	-	+	+	+	-	-	+	-	-	-
X25	-	+	+	+	+	+	-	+	+	+	-	-	+	-	-	-	-
X26	+	+	+	+	+	-	+	+	+	-	-	+	-	-	-	-	-
X27	+	+	+	+	-	+	+	+	-	-	+	-	-	-	-	+	-
X28	+	+	+	-	+	+	+	-	-	+	-	-	-	-	+	-	-
X29	+	+	-	+	+	+	-	-	+	-	-	-	-	+	-	+	-
X30	+	-	+	+	+	-	-	+	-	-	-	-	+	-	+	-	-
X31	-	+	+	+	-	-	+	-	-	-	-	+	-	+	-	+	-
X32	+	+	+	-	-	+	-	-	-	-	+	-	+	-	+	+	-
X33	+	+	-	-	+	-	-	-	+	-	+	-	+	+	+	-	-
X34	+	-	-	+	-	-	-	-	+	-	+	-	+	+	-	-	-
X35	-	-	+	-	-	-	-	+	-	+	-	+	+	-	-	+	-

VI . 1 . 2 . MÉTODOS DE PLANEJAMENTO FATORIAL COMPLETO PARA 6 VARIÁVEIS.

Nº	VARIÁVEIS						C.O.P.	Nº	VARIÁVEIS						C.O.P.
	X1	X2	X3	X4	X5	X6			X1	X2	X3	X4	X5	X6	
01	-	-	-	-	-	-	3.5714	33	-	-	-	-	-	+	3.5704
02	+	-	-	-	-	-	8.2265	34	+	-	-	-	-	+	8.1961
03	-	+	-	-	-	-	2.7492	35	-	+	-	-	-	+	2.7571
04	+	+	-	-	-	-	5.2771	36	+	+	-	-	-	+	5.2911
05	-	-	+	-	-	-	4.6623	37	-	-	+	-	-	+	4.6653
06	+	-	+	-	-	-	10.7355	38	+	-	+	-	-	+	10.7252
07	-	+	+	-	-	-	3.5939	39	-	+	+	-	-	+	3.6012
08	+	+	+	-	-	-	6.9029	40	+	+	+	-	-	+	6.9172
09	-	-	-	+	-	-	3.5714	41	-	-	-	+	-	+	3.5694
10	+	-	-	+	-	-	8.2265	42	+	-	-	+	-	+	8.2032
11	-	+	-	+	-	-	2.7492	43	-	+	-	+	-	+	2.7539
12	+	+	-	+	-	-	5.2771	44	+	+	-	+	-	+	5.2855
13	-	-	+	+	-	-	4.6623	45	+	-	+	+	-	+	4.6676
14	+	-	+	+	-	-	10.7355	46	+	-	+	+	-	+	10.7083
15	-	+	+	+	-	-	3.5939	47	-	+	+	+	-	+	3.6062
16	+	+	+	+	-	-	6.9029	48	+	+	+	+	-	+	6.9269
17	-	-	-	-	+	-	3.5714	49	-	-	-	-	+	+	3.5704
18	+	-	-	-	+	-	8.2265	50	+	-	-	-	+	+	8.1961
19	-	+	-	-	+	-	2.7492	51	-	+	-	-	+	+	2.7571
20	+	+	-	-	+	-	5.2771	52	+	+	-	-	+	+	5.2911
21	-	-	+	-	+	-	4.6623	53	-	-	+	-	+	+	4.6676
22	+	-	+	-	+	-	10.7355	54	+	-	+	-	+	+	10.7083
23	-	+	+	-	+	-	3.5939	55	-	+	+	-	+	+	3.6062
24	+	+	+	-	+	-	6.9029	56	+	+	+	-	+	+	6.9269
25	-	-	-	+	+	-	3.5714	57	-	-	-	+	+	+	3.5704
26	+	-	-	+	+	-	8.2265	58	+	-	-	+	+	+	8.1961
27	-	+	-	+	+	-	2.7492	59	-	+	-	+	+	+	2.7571
28	+	+	-	+	+	-	5.2771	60	+	+	-	+	+	+	5.2911
29	-	-	+	+	+	-	4.6623	61	-	-	+	+	+	+	4.6676
30	+	-	+	+	+	-	10.7355	62	+	-	+	+	+	+	10.7083
31	-	+	+	+	+	-	3.5939	63	-	+	+	+	+	+	3.6062
32	+	+	+	+	+	-	6.9029	64	+	+	+	+	+	+	6.9269

VI. 1 . 3 . PLANEJAMENTO FATORIAL COMPLETO ESTRELA DE TRÊS VARIÁVEIS.

Ensaio	Variáveis			
	Tev	Tcond	Ncomp	COP
01	-1	-1	-1	3,57
02	+1	-1	-1	8,20
03	-1	+1	-1	2,75
04	+1	+1	-1	5,28
05	-1	-1	+1	4,66
06	+1	-1	+1	10,72
07	-1	+1	+1	3,60
08	+1	+1	+1	6,92
09	-1.682	0	0	2,97
10	+1.682	0	0	10,76
11	0	-1.682	0	6,72
12	0	+1.682	0	3,88
13	0	0	-1.682	3,86
14	0	0	+1.682	6,08

VI. 2 . SUPERFÍCIE DE RESPOSTA

VI. 2 . 1 . SUPERFÍCIE DE RESPOSTA DO MODELO QUADRÁTICO PARA SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO DEFINIDO COM CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO VARIÁVEL

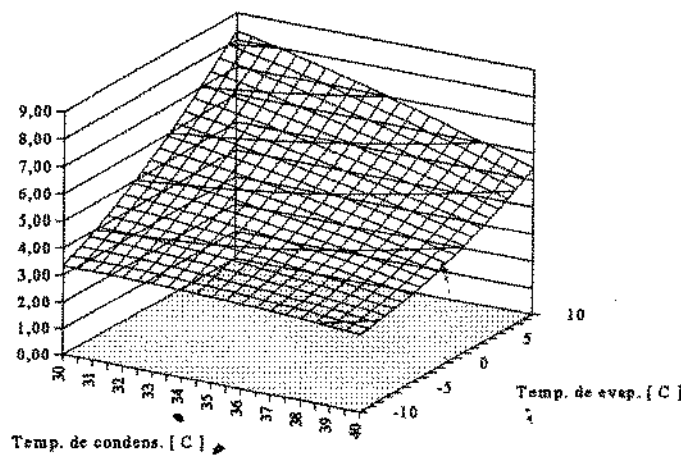


Figura 16 . Variação do C.O.P. . em função de T_{ev} e de T_{cond} com $\eta_{comp} = 65\%$.

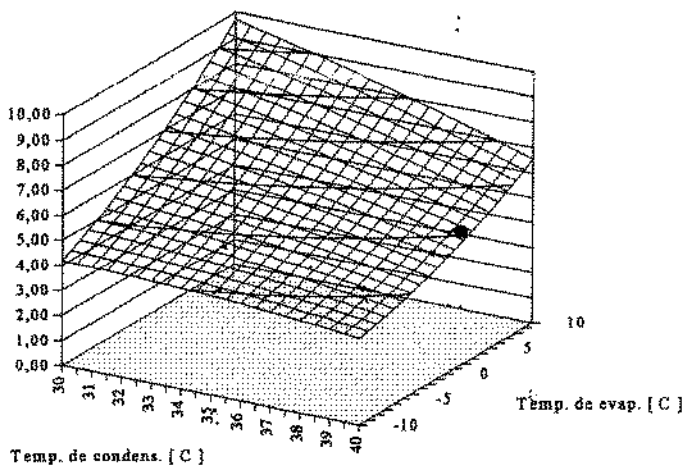


Figura 17 . Variação do C.O.P. . em função de T_{ev} e de T_{cond} com $\eta_{comp} = 75\%$.

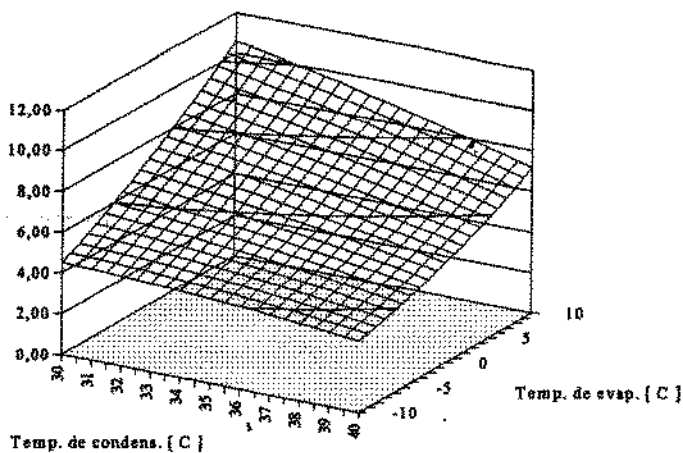


Figura 18 . Variação do C.O.P. em função de T_{ev} e de T_{cond} com $\eta_{comp} = 85\%$.

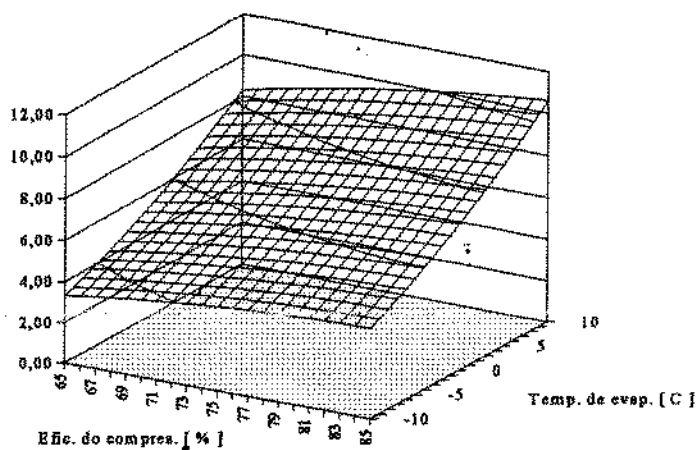


Figura 19 . Variação do C.O.P. em função de T_{ev} e de η_{comp} com $T_{cond} = 30\text{ °C}$.

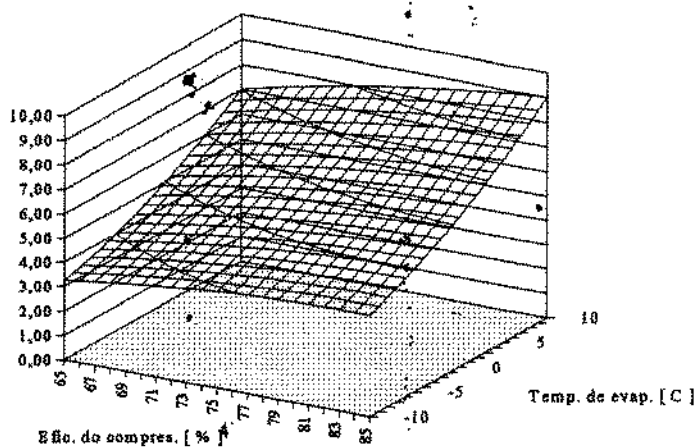


Figura 20 . Variação do C.O.P. em função de T_{ev} e de η_{comp} com $T_{cond} = 35\text{ °C}$.

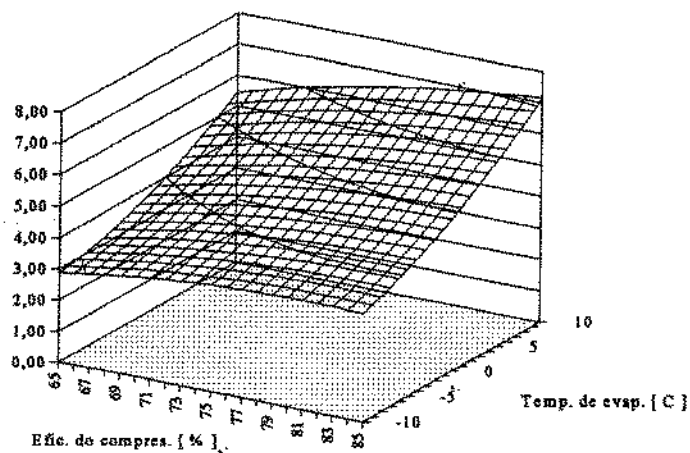


Figura 21 . Variação do C.O.P. em função de T_{ev} e de η_{comp} com $T_{cond} = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$.

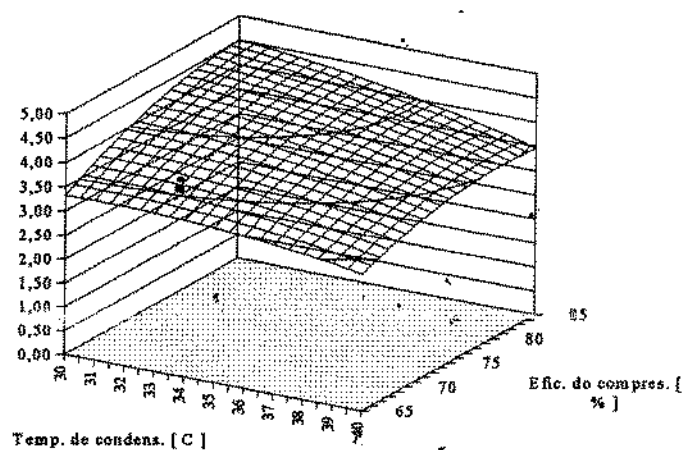


Figura 22 . Variação do C.O.P. em função de T_{cond} e de η_{comp} com $T_{ev} = -10\text{ }^{\circ}\text{C}$.

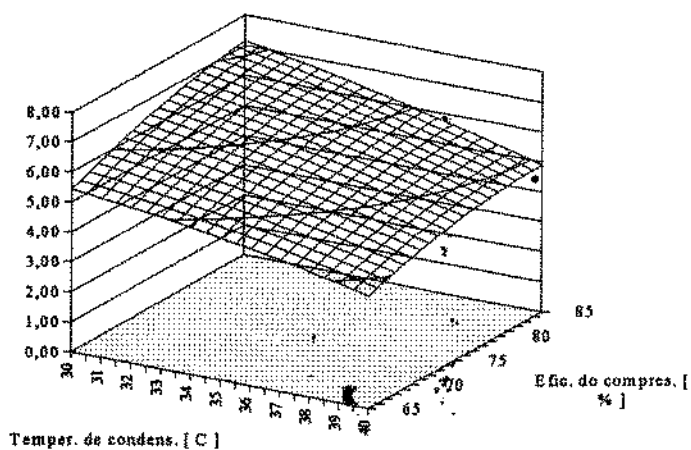


Figura 23 . Variação do C.O.P. em função de T_{cond} e de η_{comp} com $T_{ev} = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$.

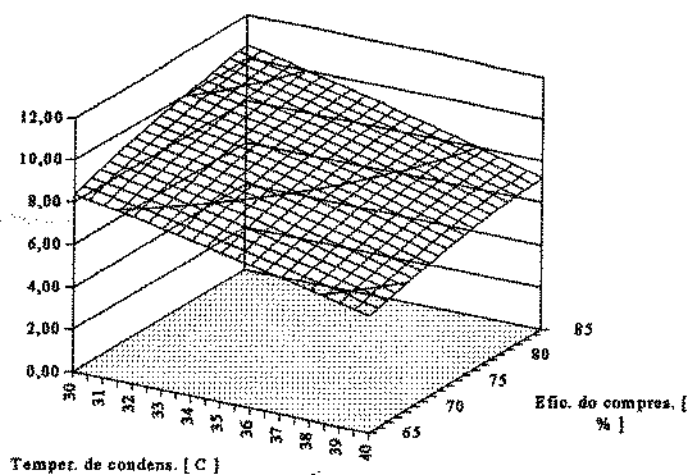


Figura 24 . Variação do C.O.P. em função de T_{cond} e de η_{comp} com $T_{\text{ev}} = + 10^{\circ}\text{C}$.

VI. 2. 2. SUPERFICIE DE RESPOSTA DO MODELO QUADRÁTICO PARA SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO DEFINIDO COM CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO FIXA

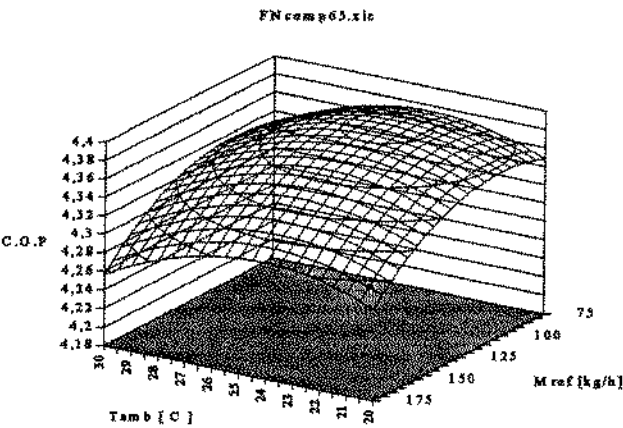


Figura 25 . Variação do C.O.P. em função de T_{amb} e de m_{ref} com $\eta_{comp} = 65\%$.

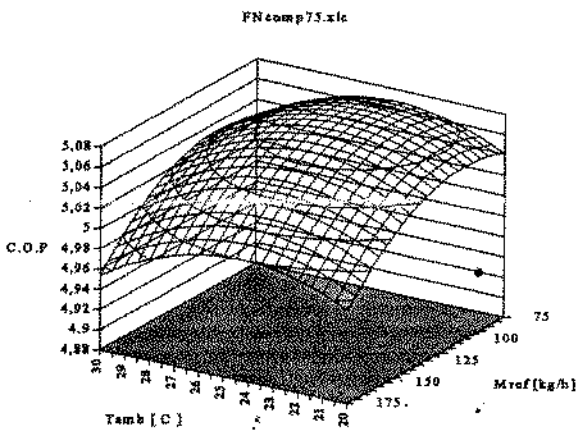


Figura 26 . Variação do C.O.P. em função de T_{amb} e de m_{ref} com $\eta_{comp} = 75\%$.

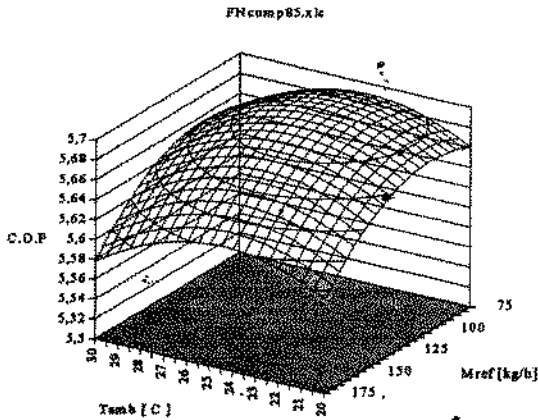


Figura 27 . Variação do C.O.P. em função de T_{amb} e de m_{ref} com $\eta_{comp} = 85\%$.

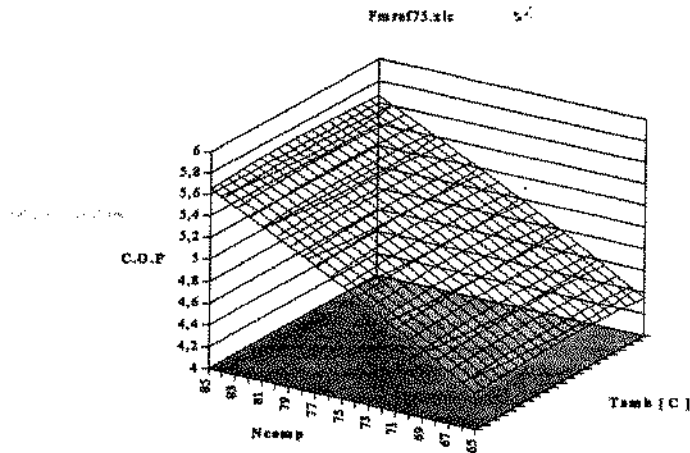


Figura 28 . Variação do C.O.P. em função de T_{amb} e de η_{comp} com $m_{ref} = 75 \text{ kg/h}$.

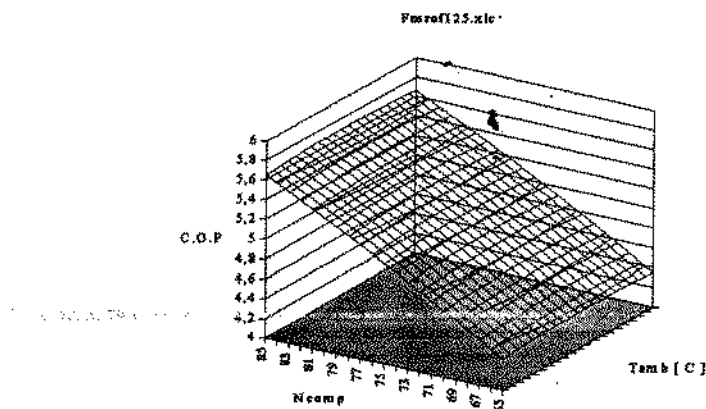


Figura 29 . Variação do C.O.P. em função de T_{amb} e de η_{comp} com $m_{ref} = 125 \text{ kg/h}$.

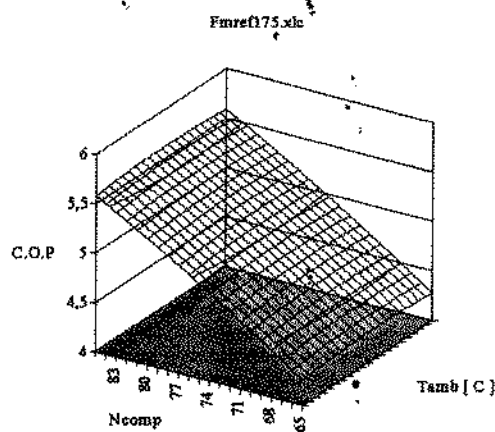


Figura 30 . Variação do C.O.P. em função de T_{amb} e de η_{comp} com $m_{ref} = 175 \text{ kg/h}$.

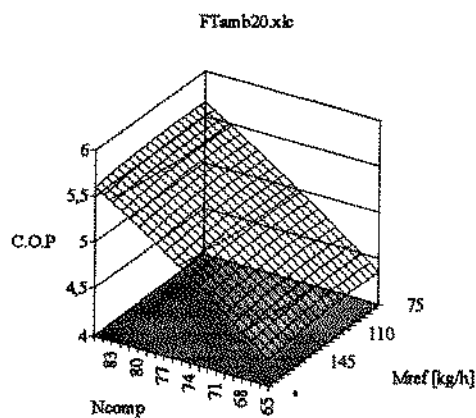


Figura 31 . Variação do C.O.P. em função de m_{ref} e de η_{comp} com $T_{amb} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

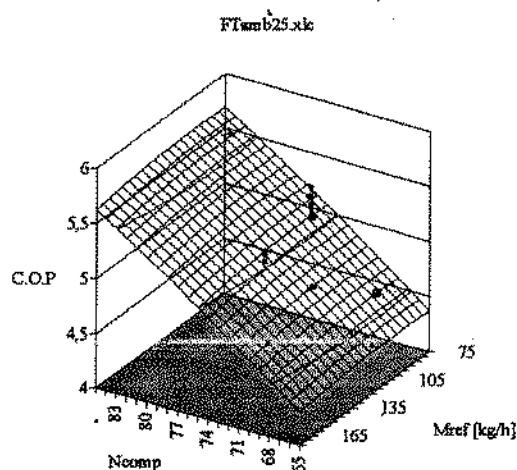


Figura 32 . Variação do C.O.P. em função de m_{ref} e de η_{comp} com $T_{amb} = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$.

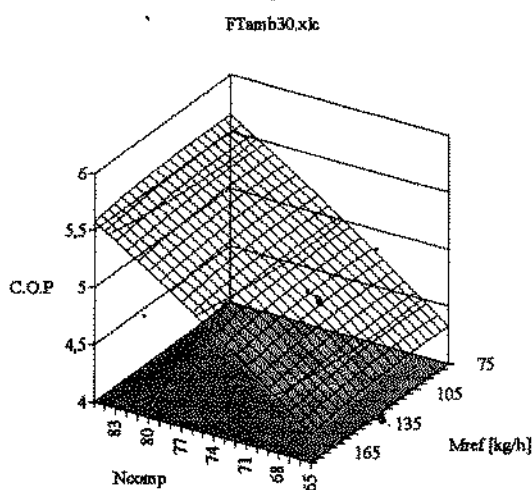


Figura 33 . Variação do C.O.P. em função de m_{ref} e de η_{comp} com $T_{amb} = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$.

VI. 3 . EFEITOS PERCENTUAIS DAS VARIÁVEIS DE PROCESSO VERSUS FAIXAS DE OPERAÇÃO DE VARIÁVEL ESPECÍFICA.

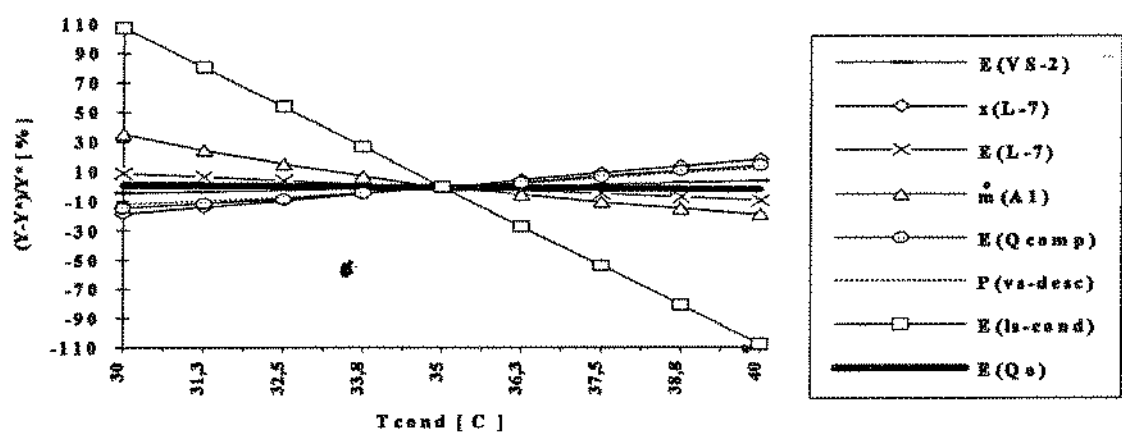


Figura 34 . Efeitos percentuais das variáveis versus faixa de operação de Tcond .

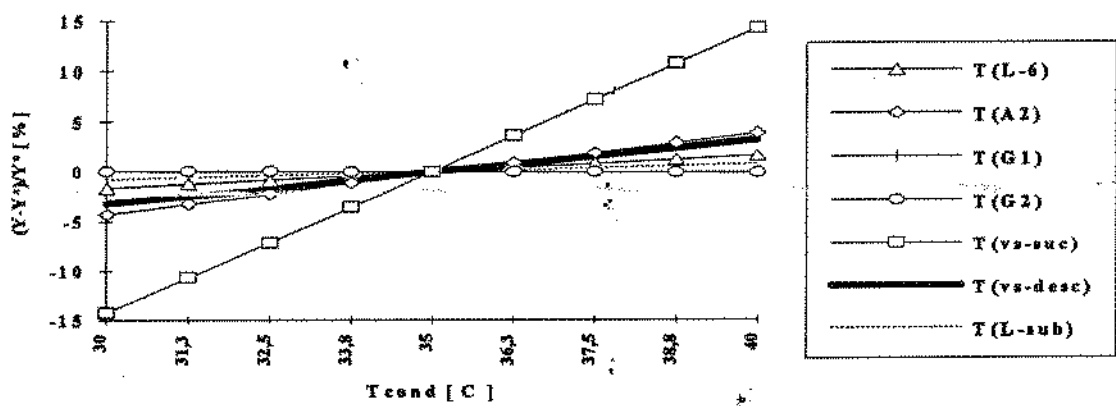


Figura 35 . Efeitos percentuais das variáveis versus faixa de operação de Tcond .

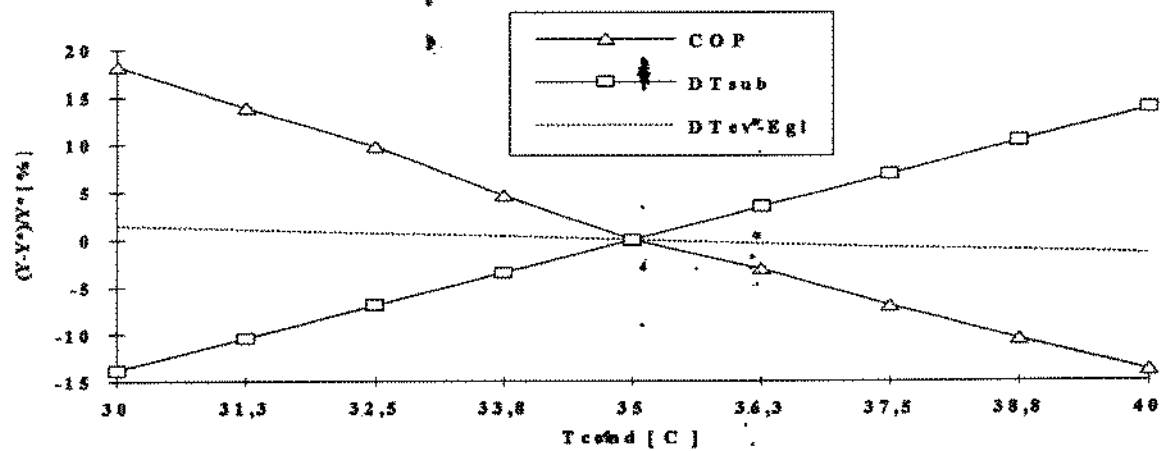


Figura 36 . Efeitos percentuais das variáveis versus faixa de operação de Tcond .

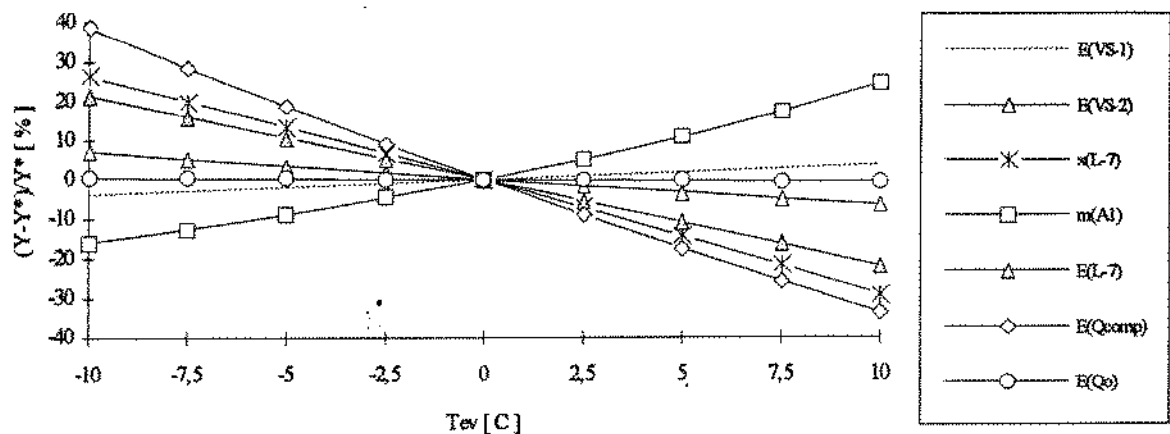


Figura 37 . Efeitos percentuais das variáveis versus faixa de operação de T_{ev} .

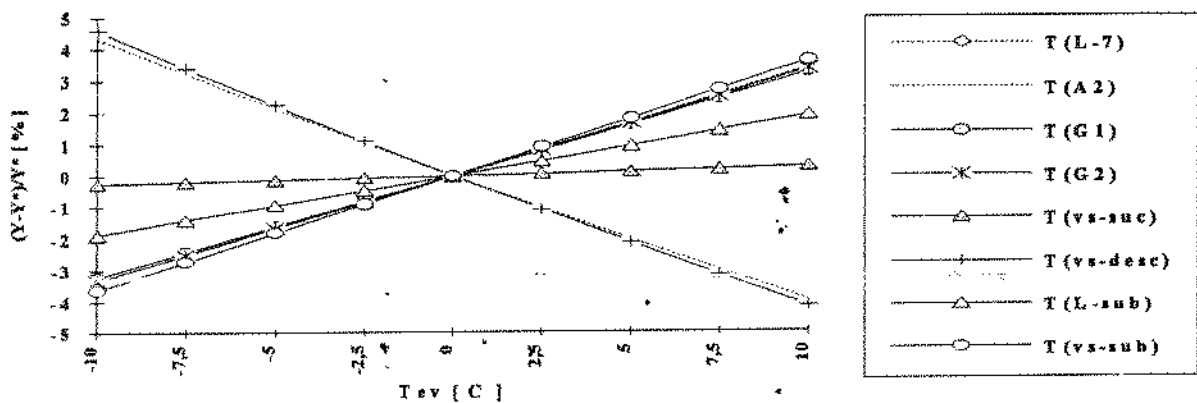


Figura 38 . Efeitos percentuais das variáveis versus faixa de operação de T_{ev} .

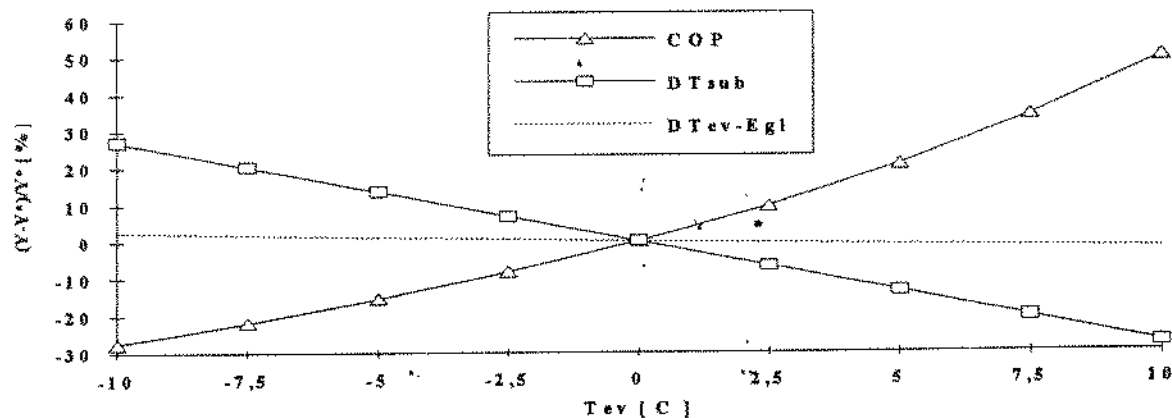


Figura 39 . Efeitos percentuais das variáveis versus faixa de operação de T_{ev} .

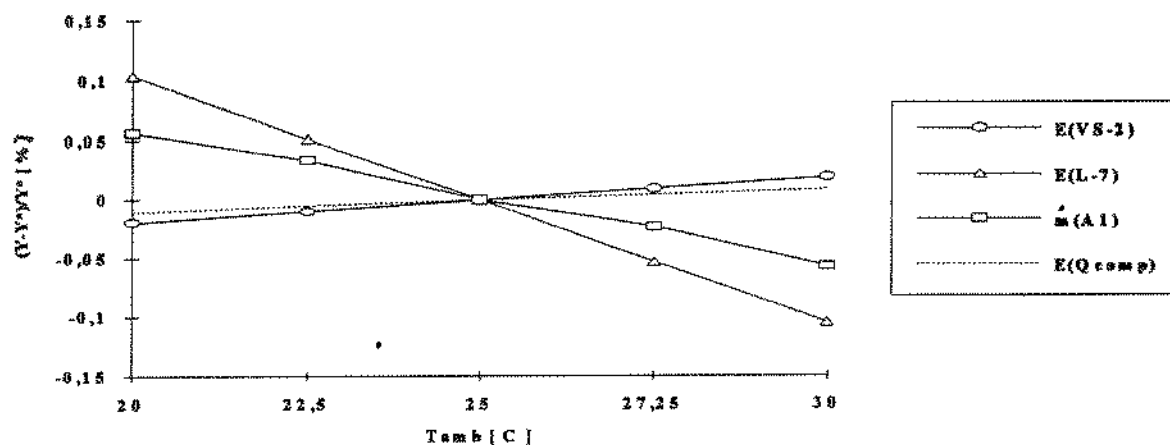


Figura 40 . Efeitos percentuais das variáveis *versus* faixa de operação de T_{amb} .

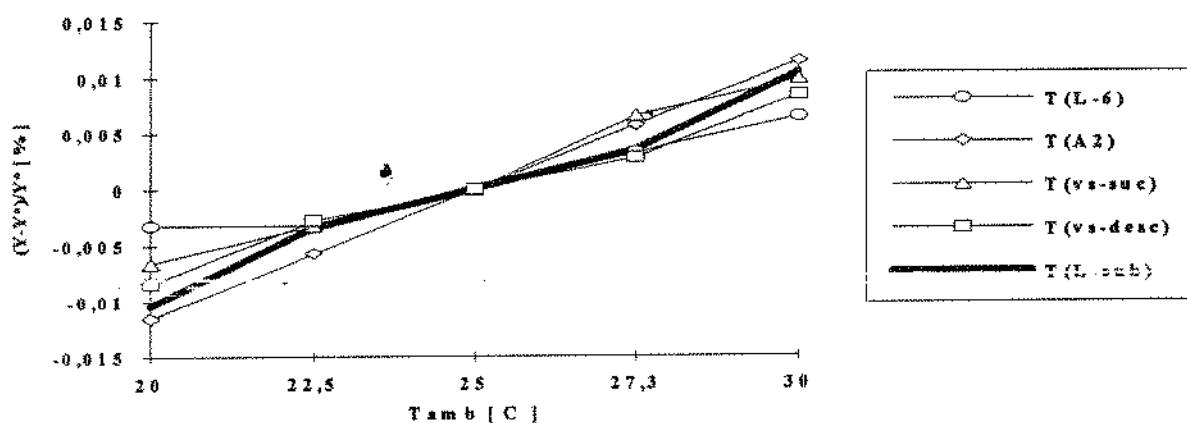


Figura 41 . Efeitos percentuais das variáveis *versus* faixa de operação de T_{amb} .

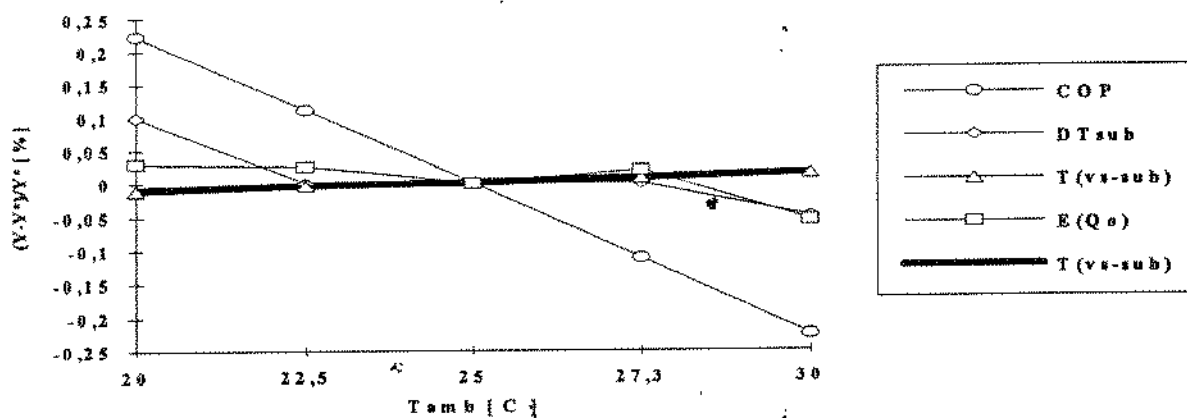


Figura 42 . Efeitos percentuais das variáveis *versus* faixa de operação de T_{amb} .

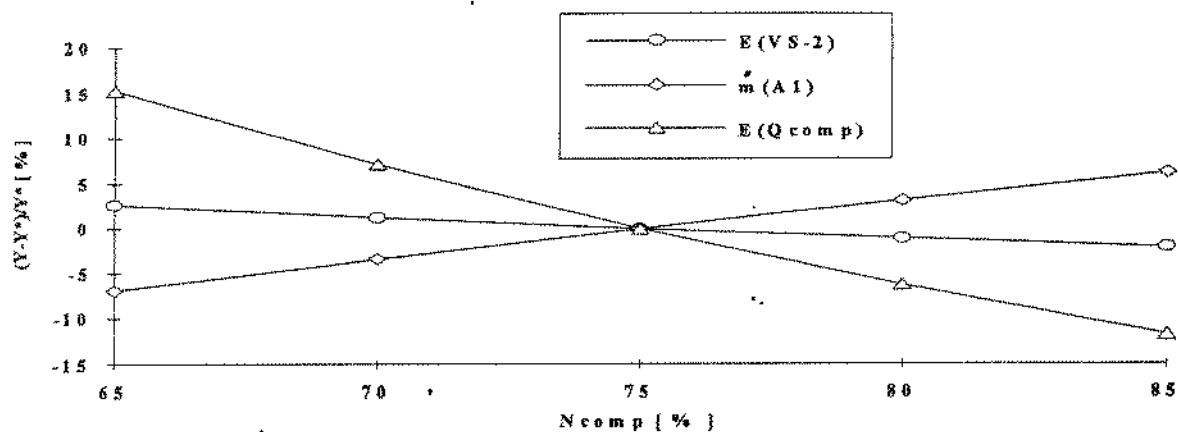


Figura 43 . Efeitos percentuais das variáveis *versus* faixa de operação de η_{comp} .

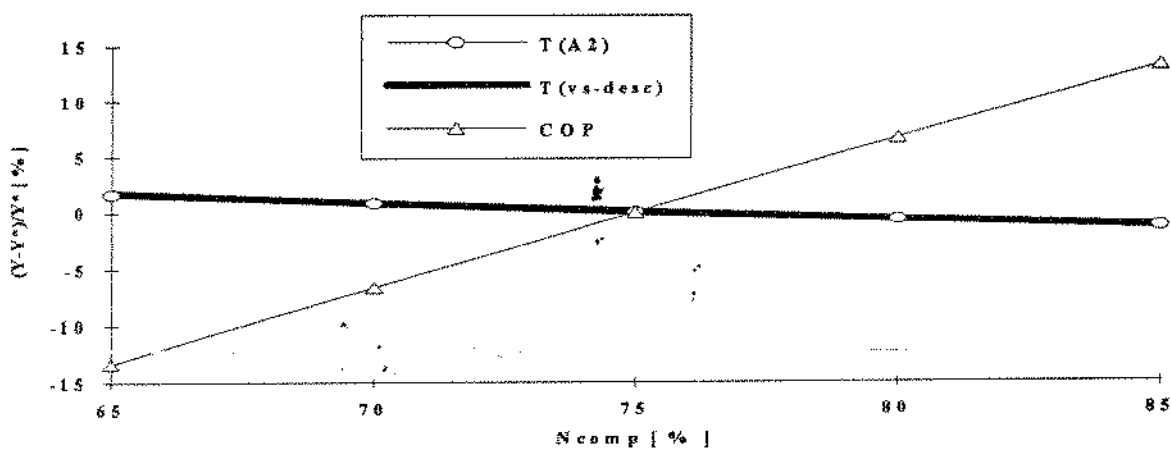


Figura 44 . Efeitos percentuais das variáveis *versus* faixa de operação de η_{comp} .

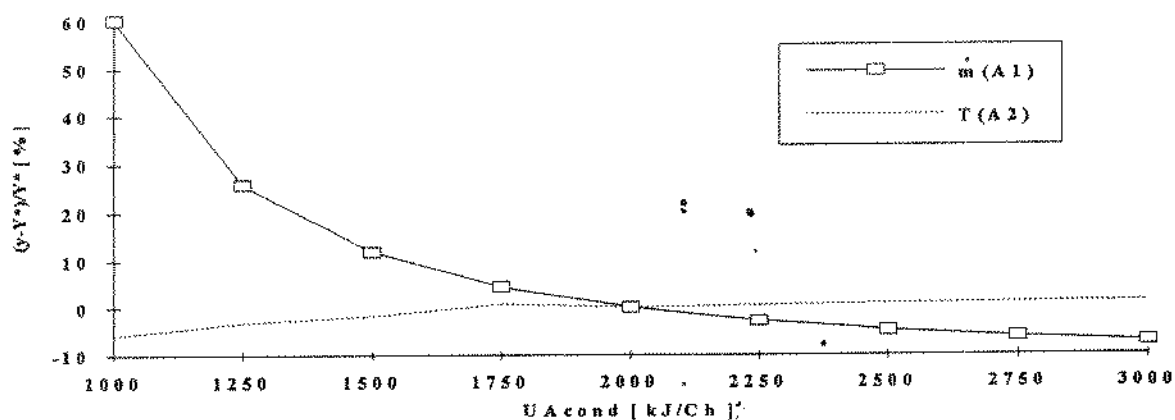


Figura 45 . Efeitos percentuais das variáveis *versus* faixa de operação de UA_{cond} .

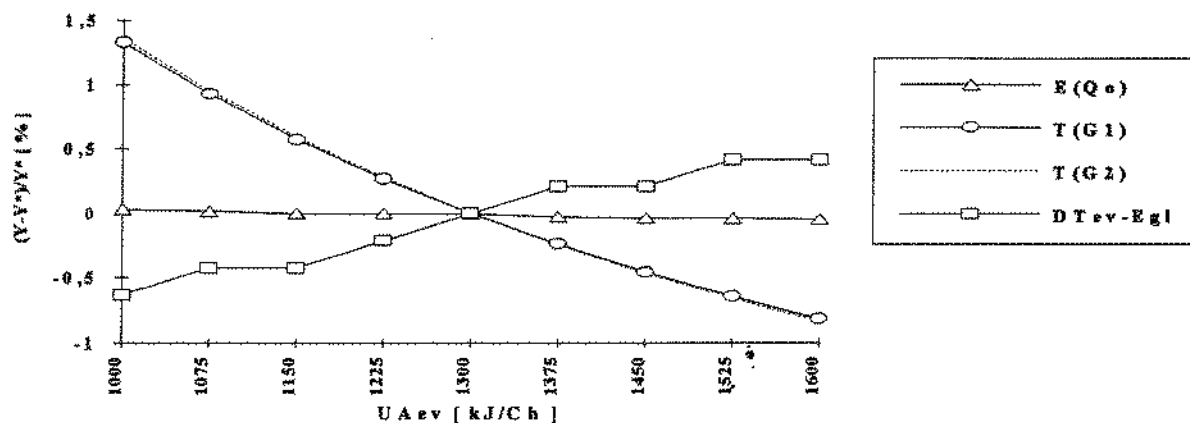


Figura 46 . Efeitos percentuais das variáveis *versus* faixa de operação de UA_{ev} .

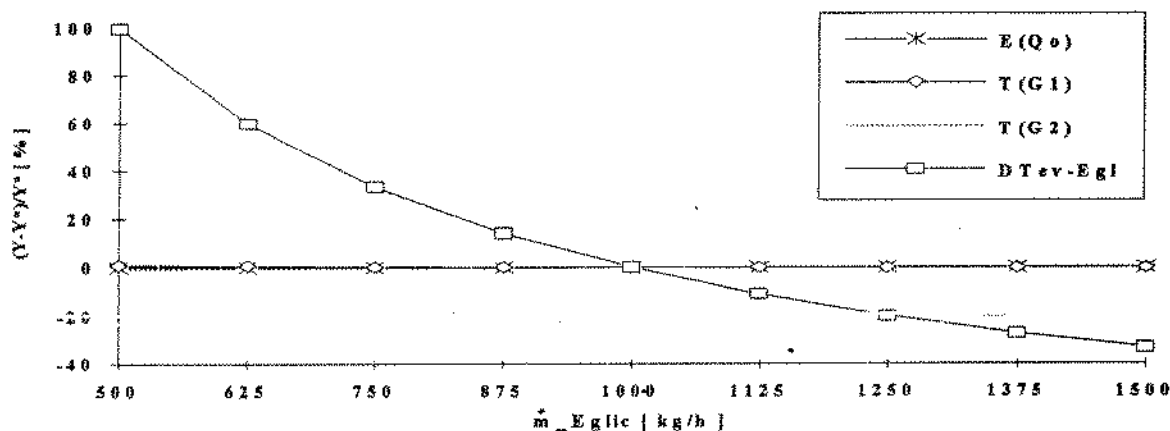


Figura 47 . Efeitos percentuais das variáveis *versus* faixa de operação de m_{Eglic} .

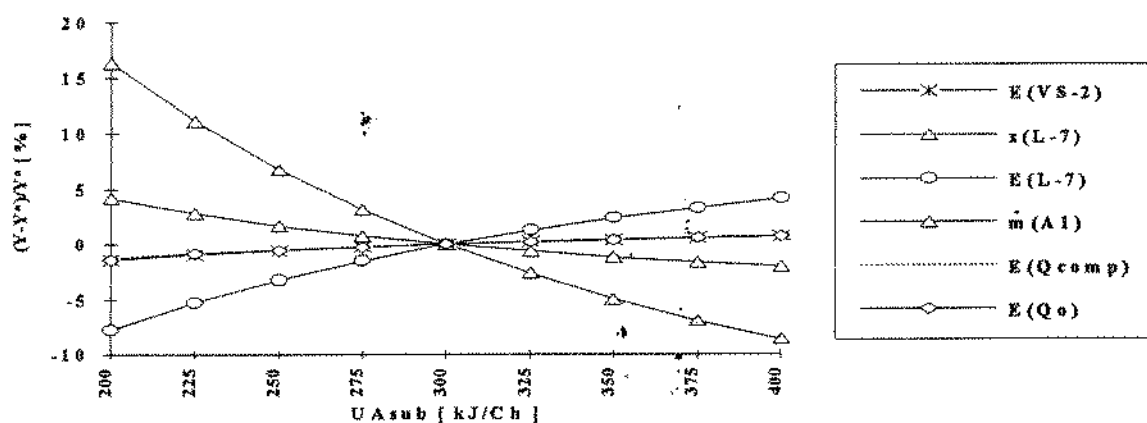
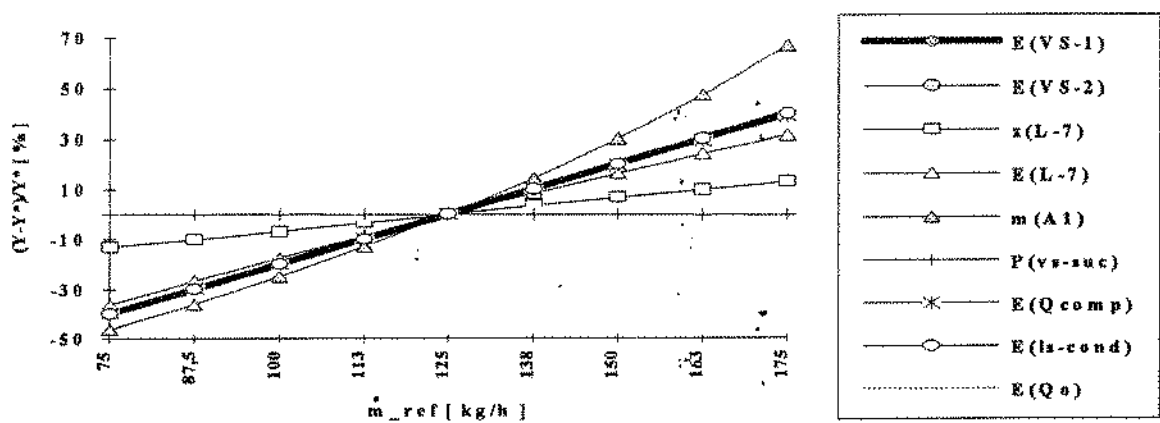
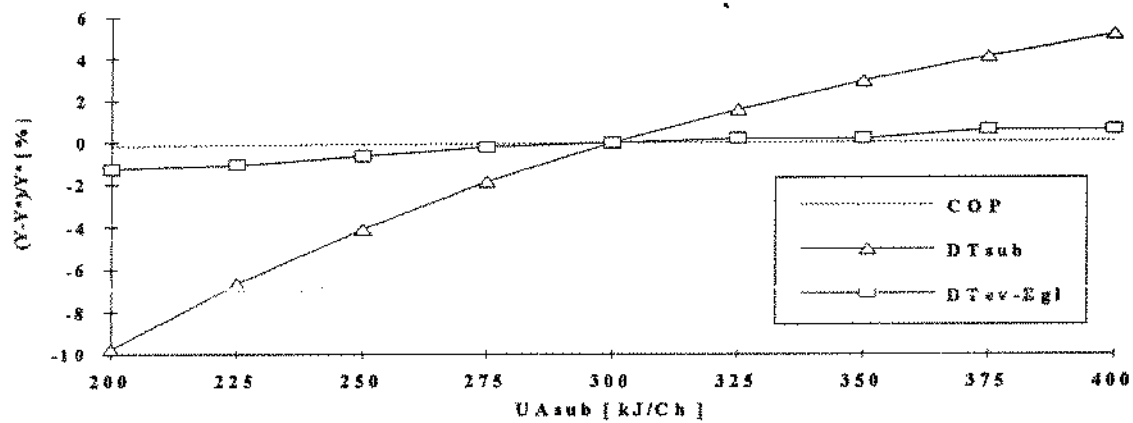
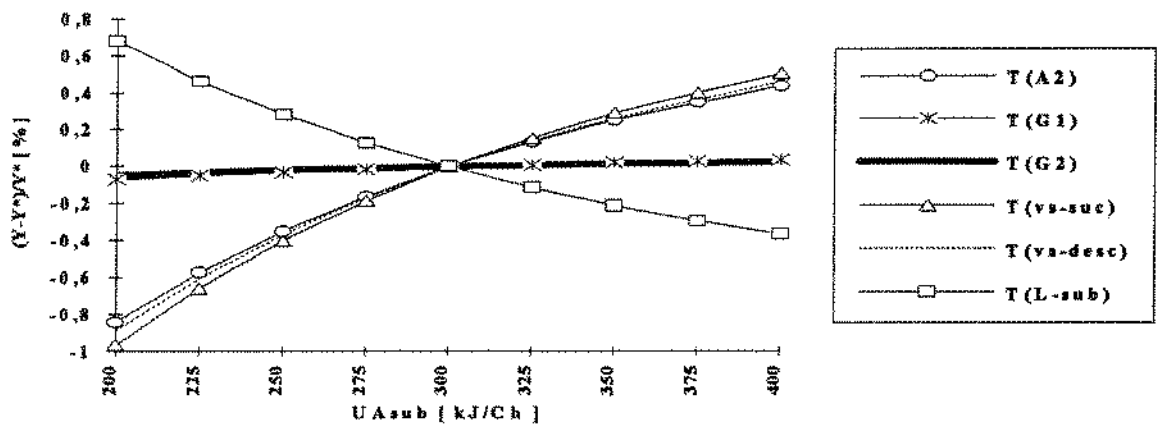


Figura 48 . Efeitos percentuais das variáveis *versus* faixa de operação de UA_{sub} .



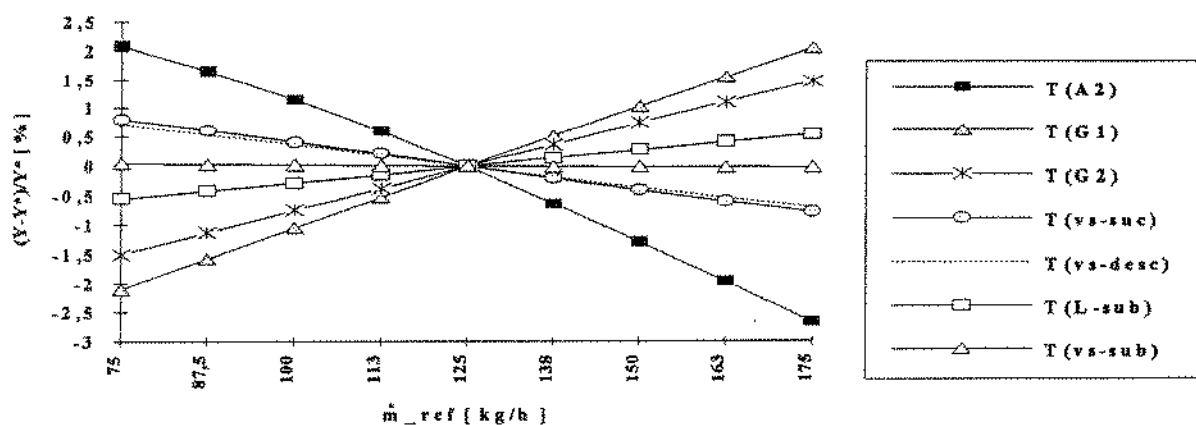


Figura 52 . Efeitos percentuais das variáveis versus faixa de operação de m_{ref} .

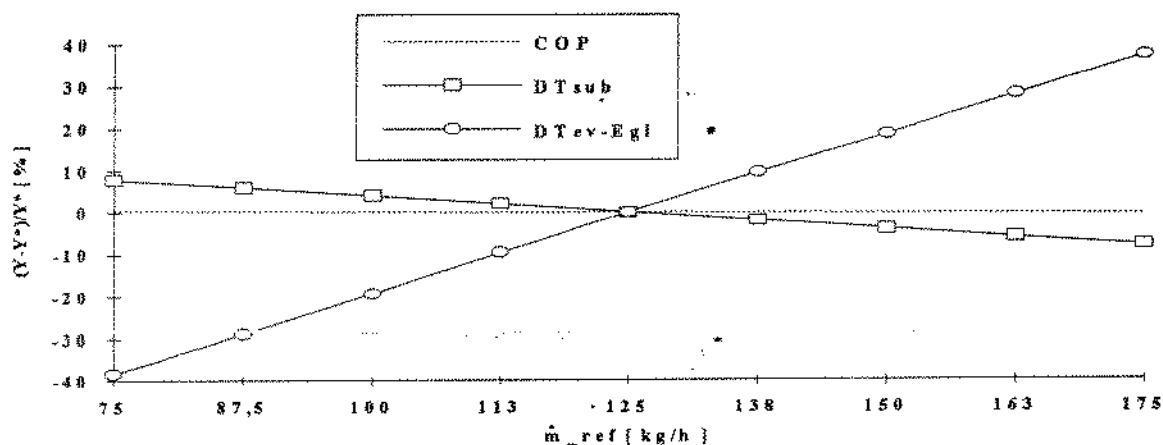


Figura 53 . Efeitos percentuais das variáveis versus faixa de operação de m_{ref} .

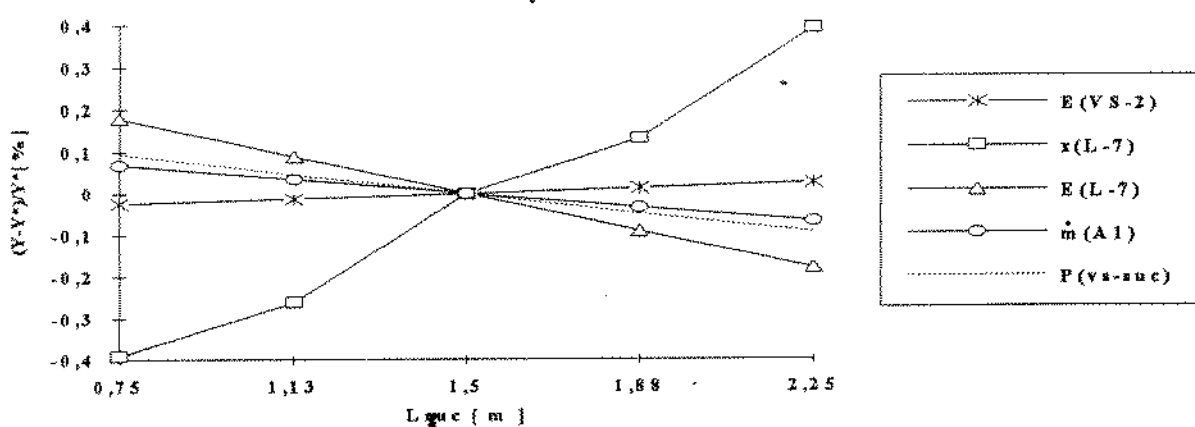


Figura 54 . Efeitos percentuais das variáveis versus faixa de operação de L_{suc} .

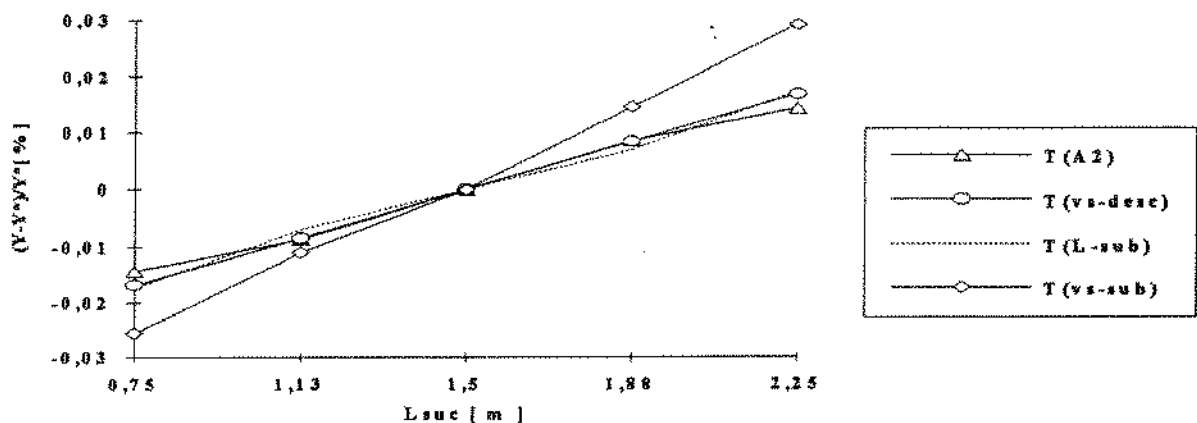


Figura 55 . Efeitos percentuais das variáveis *versus* faixa de operação de L_{suc} .

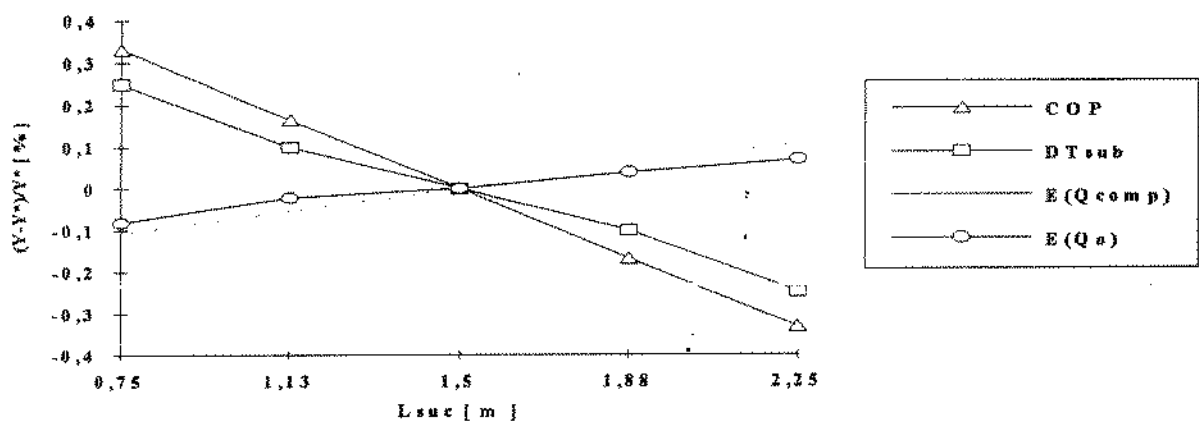


Figura 56 . Efeitos percentuais das variáveis *versus* faixa de operação de L_{suc} .

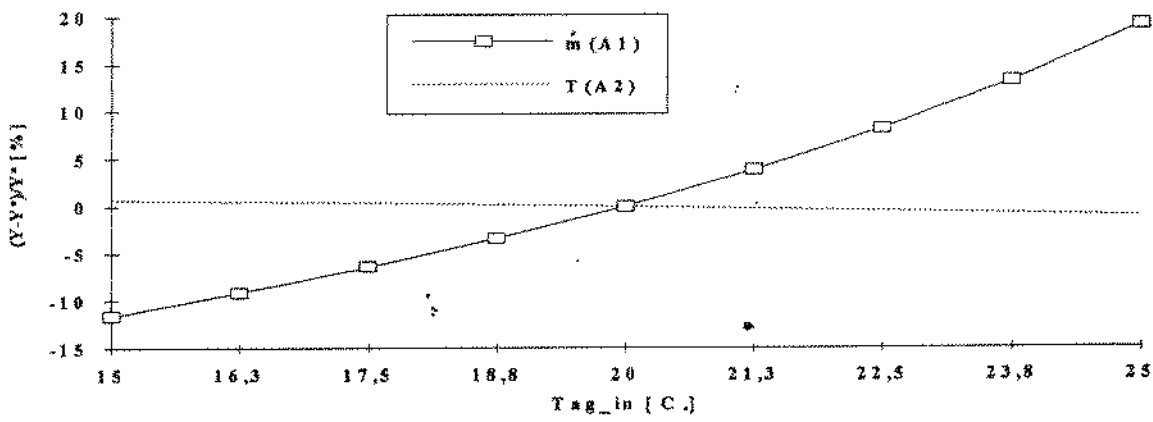


Figura 57 . Efeitos percentuais das variáveis *versus* faixa de operação de T_{ag-in} .

VI. 4 . RESULTADOS DO COMPORTAMENTO DO MODELO.

VI. 4 . 1 . COMPARAÇÃO DAS PRECISÕES DAS VARIÁVEIS NAS SIMULAÇÕES COM INCREMENTOS DE TEMPOS DIFERENTES.

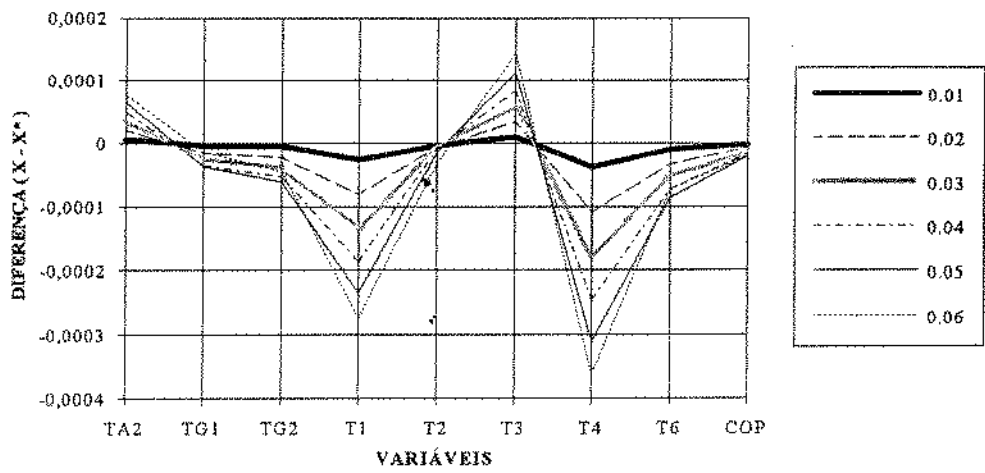


Figura 58 . Diferença dos valores das variáveis no instante de 1 min. para diferentes incrementos de tempo em relação aos valores obtidos quando se usa $\Delta t = 0,005$ s.

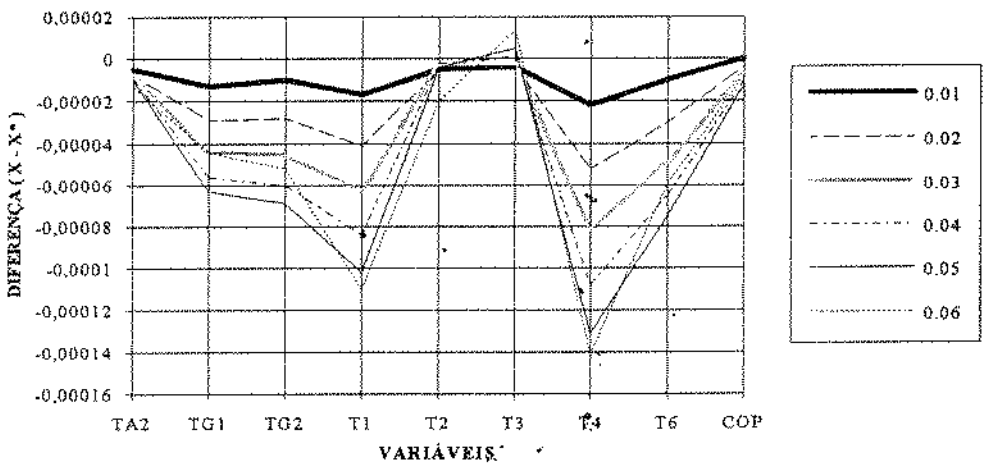


Figura 59 . Diferença dos valores das variáveis no instante de 2 min. para diferentes incrementos de tempo em relação aos valores obtidos quando se usa $\Delta t = 0,005$ s.

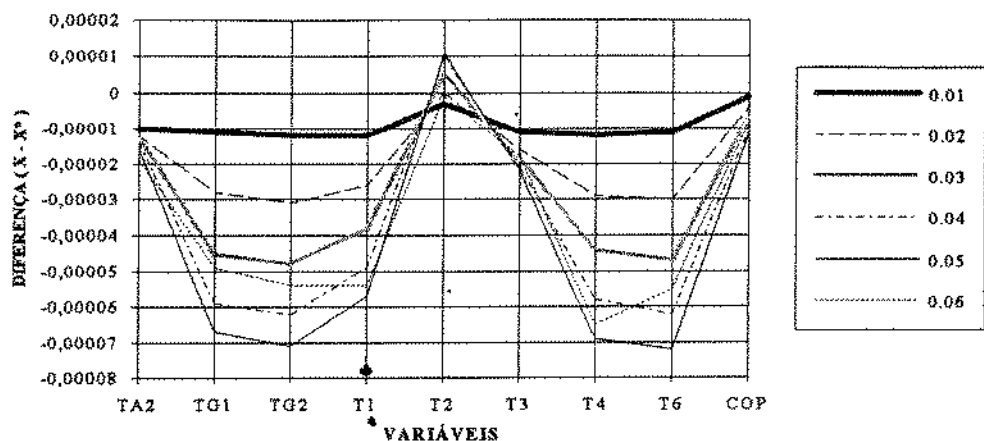


Figura 60 . Diferença dos valores das variáveis no instante de 3 min. para diferentes incrementos de tempo em relação aos valores obtidos quando se usa $\Delta t = 0,005$ s.

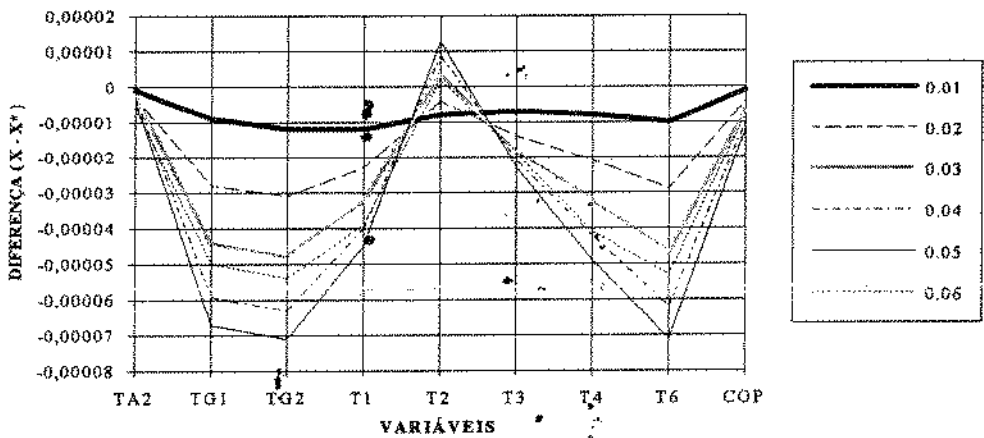


Figura 61 . Diferença dos valores das variáveis no instante de 4 min. para diferentes incrementos de tempo em relação aos valores obtidos quando se usa $\Delta t = 0,005$ s.

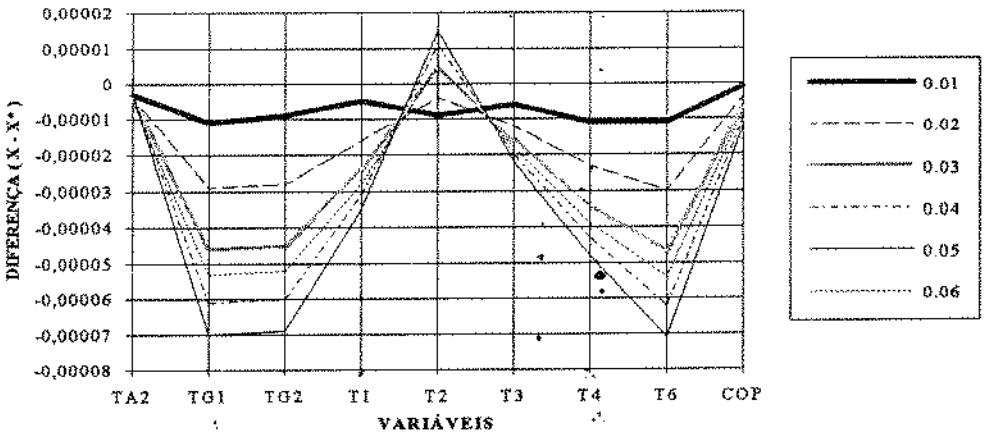


Figura 62 . Diferença dos valores das variáveis no instante de 5 min. para diferentes incrementos de tempo em relação aos valores obtidos quando se usa $\Delta t = 0,005$ s.

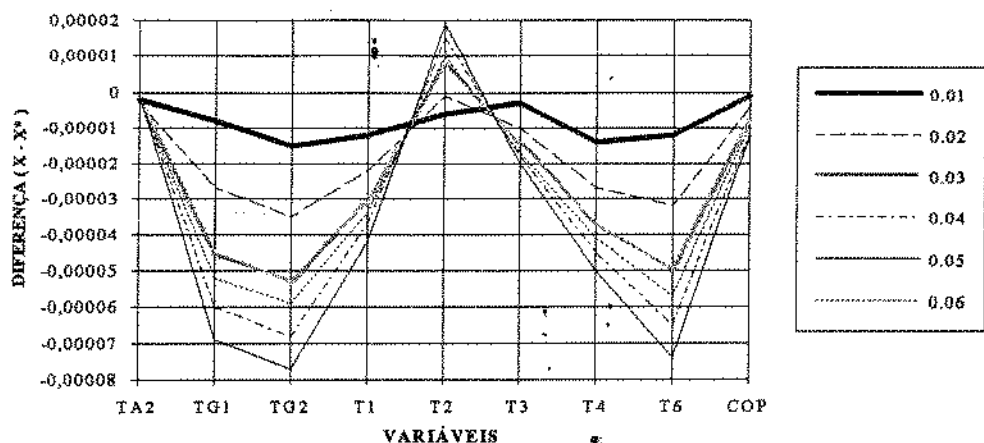


Figura 63 . Diferença dos valores das variáveis no instante de 10 min. para diferentes incrementos de tempo em relação aos valores obtidos quando se usa $\Delta t = 0,005$ s.

VI. 4. 2. RESULTADOS DA SIMULAÇÃO DO PROCESSO SOB PERTURBAÇÃO.

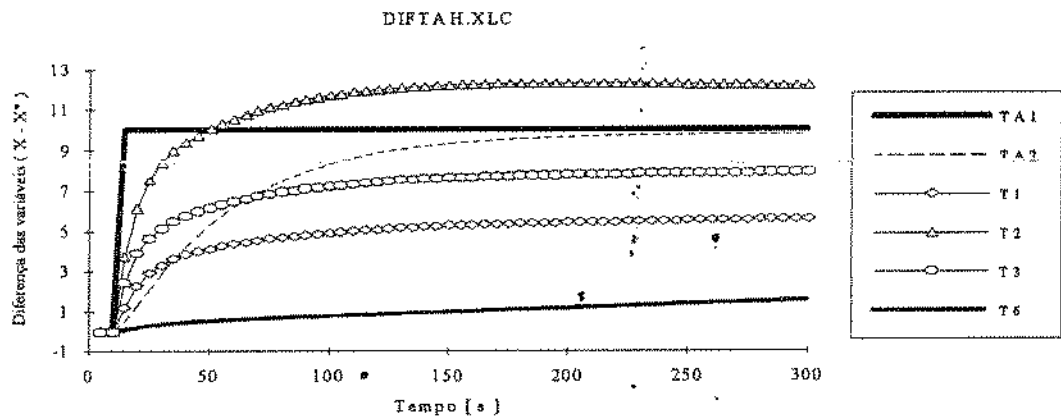


Figura 64 . Histórico das diferenças dos valores das variáveis do processo em relação a seu valor inicial de estado estacionário quando submetido a uma perturbação em degrau de + 10 °C de TA1.

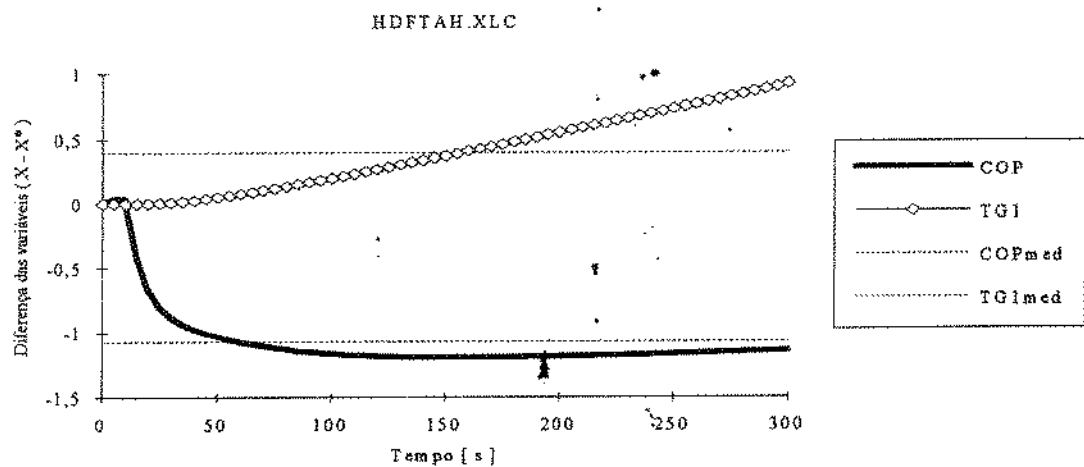


Figura 65 . Histórico das diferenças dos valores das variáveis do processo em relação a seu valor inicial de estado estacionário quando submetido a uma perturbação em degrau de + 10 °C de TA1.

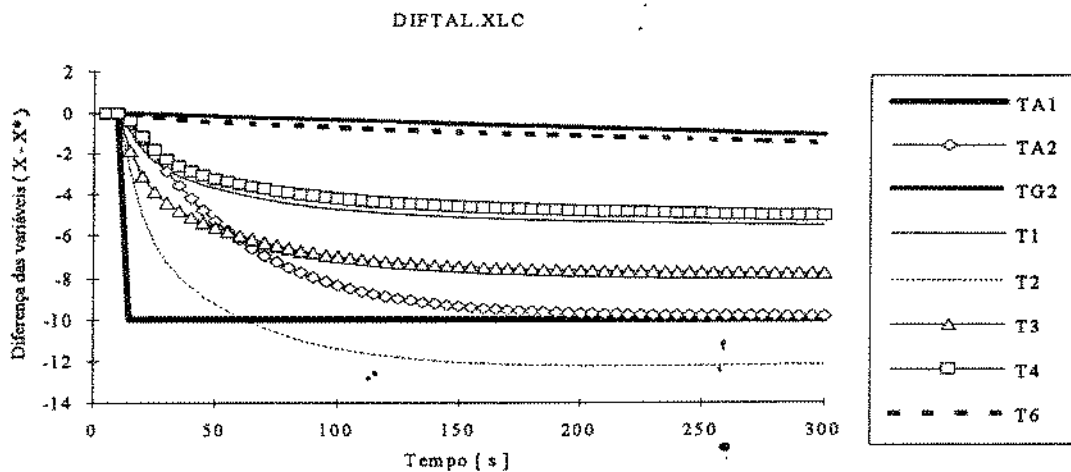


Figura 66 . Histórico das diferenças dos valores das variáveis do processo em relação a seu valor inicial de estado estacionário quando submetido a uma perturbação em degrau de $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ de TA1.

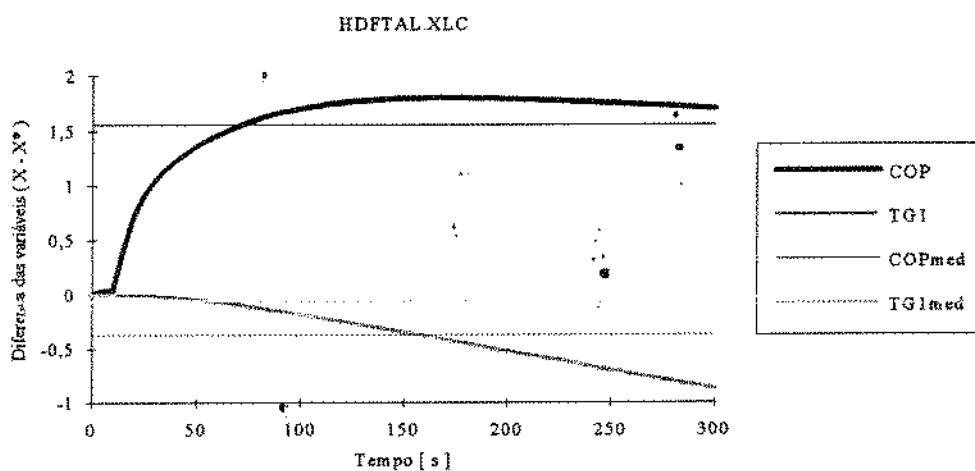


Figura 67 . Histórico das diferenças dos valores das variáveis do processo em relação a seu valor inicial de estado estacionário quando submetido a uma perturbação em degrau de $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ de TA1.

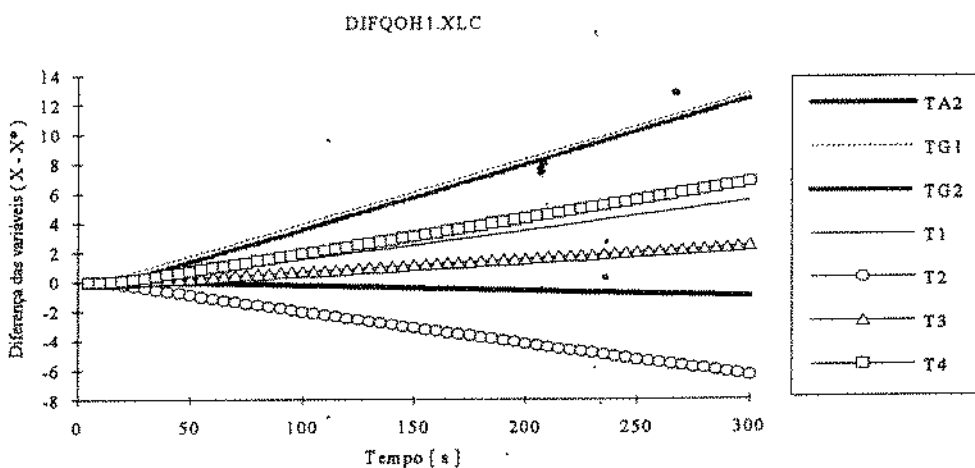


Figura 68 . Histórico das diferenças dos valores das variáveis do processo em relação a seu valor inicial de estado estacionário quando submetido a uma perturbação em degrau de $+7.000\text{ kJ/h}$ de q_0 .

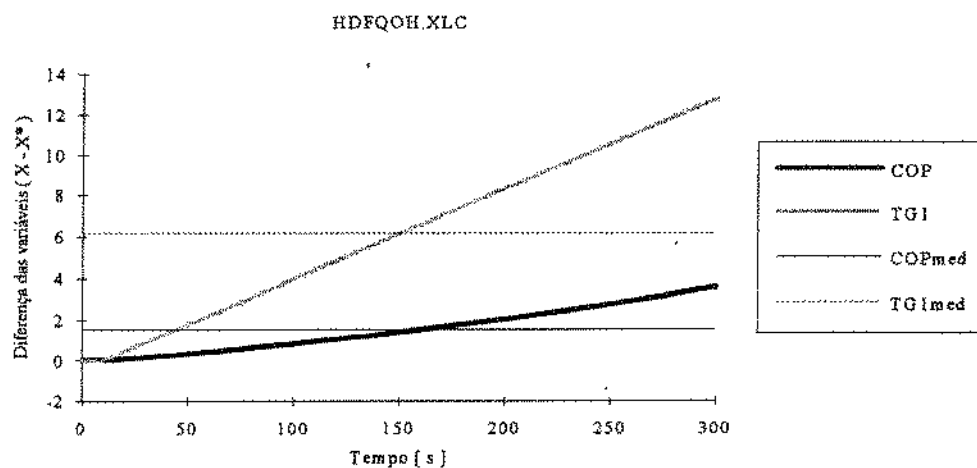


Figura 69 . Histórico das diferenças dos valores das variáveis do processo em relação a seu valor inicial de estado estacionário quando submetido a uma perturbação em degrau de +7.000 kJ/h de q_0 .

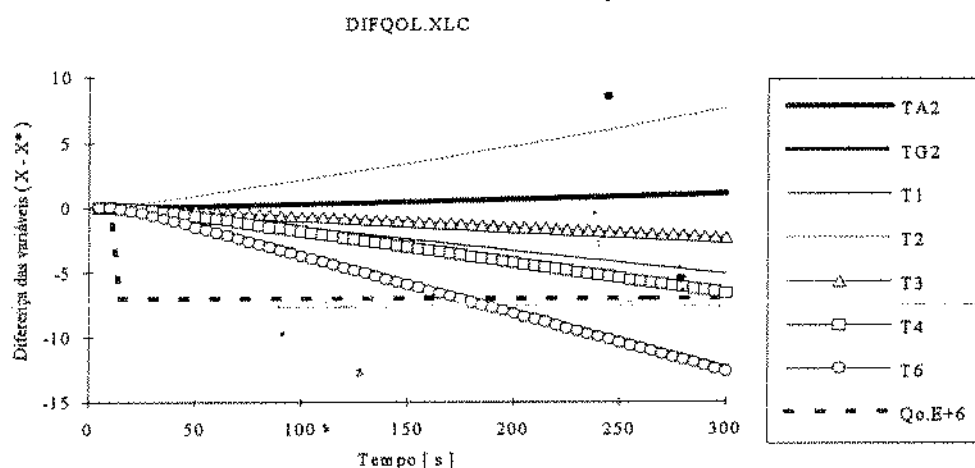


Figura 70 . Histórico das diferenças dos valores das variáveis do processo em relação a seu valor inicial de estado estacionário quando submetido a uma perturbação em degrau de -7.000 kJ/h de q_0 .

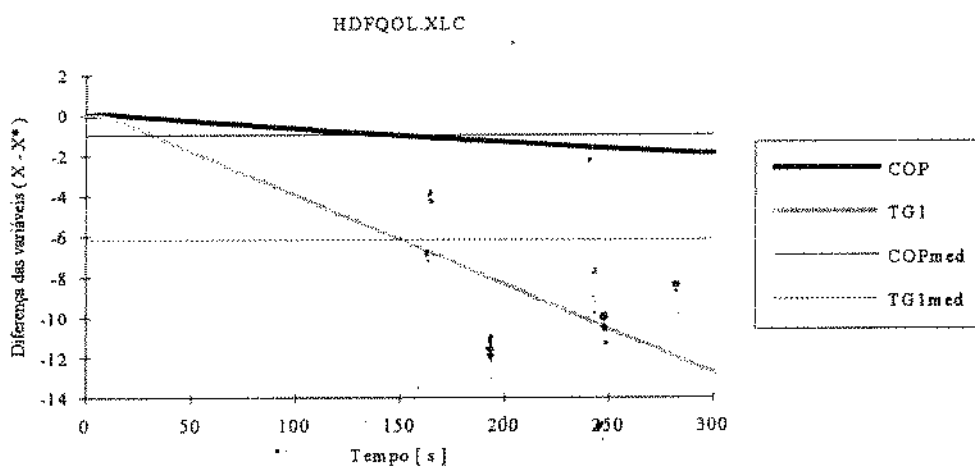


Figura 71 . Histórico das diferenças dos valores das variáveis do processo em relação a seu valor inicial de estado estacionário quando submetido a uma perturbação em degrau de -7.000 kJ/h de q_0 .

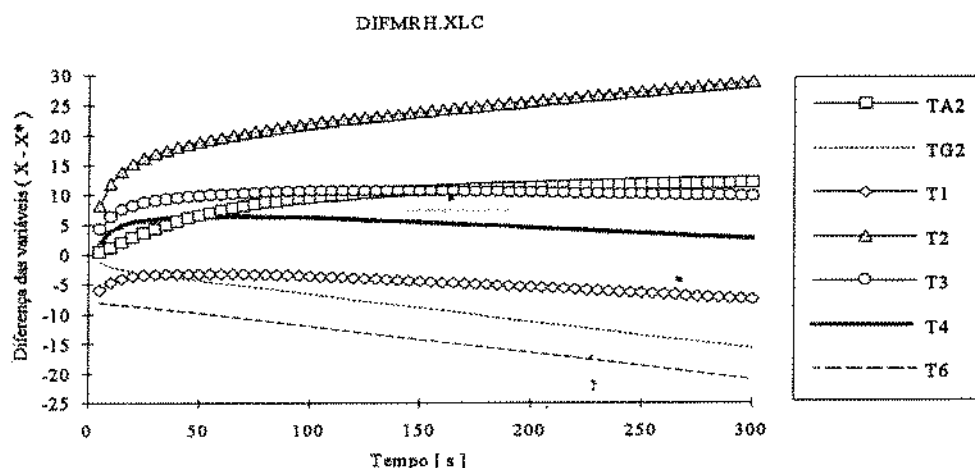


Figura 72 . Histórico das diferenças dos valores das variáveis do processo em relação a seu valor inicial de estado estacionário quando submetido a uma perturbação em degrau de + 75 kg/h de vazão mássica de refrigerante.

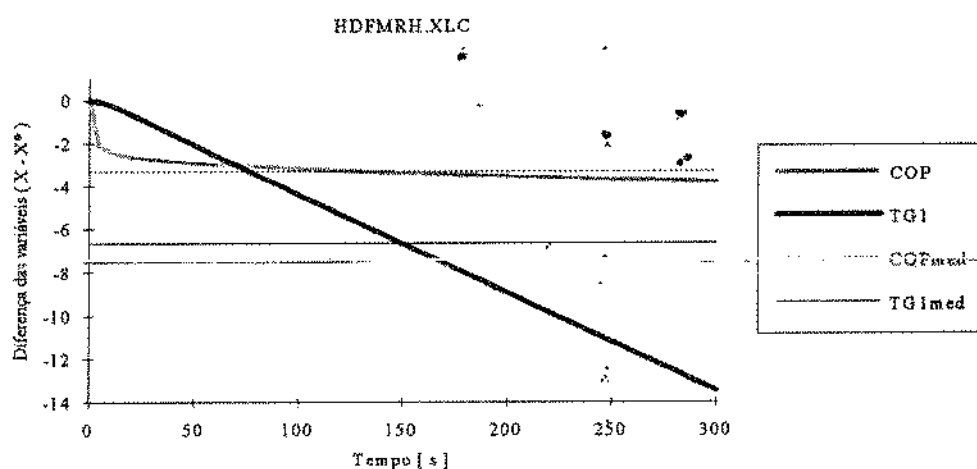


Figura 73 . Histórico das diferenças dos valores das variáveis do processo em relação a seu valor inicial de estado estacionário quando submetido a uma perturbação em degrau de + 75 kg/h de vazão mássica de refrigerante.

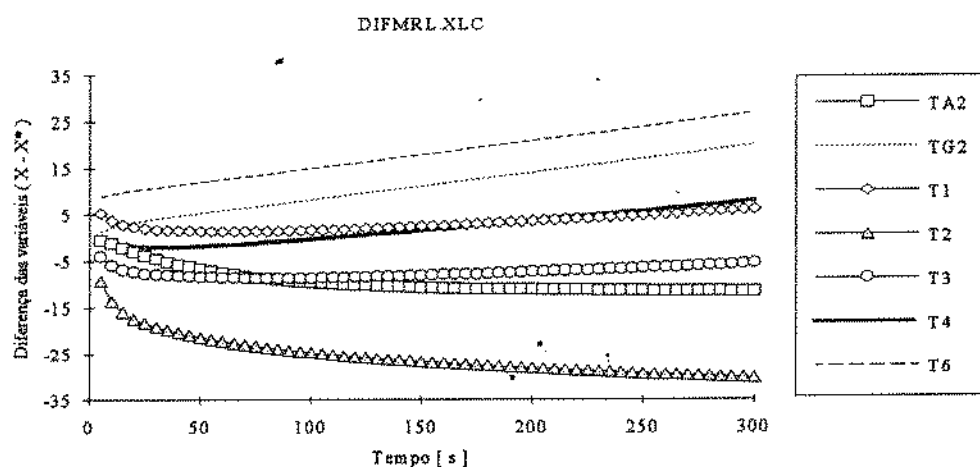


Figura 74 . Histórico das diferenças dos valores das variáveis do processo em relação a seu valor inicial de estado estacionário quando submetido a uma perturbação em degrau de - 75 kg/h de vazão mássica de refrigerante.

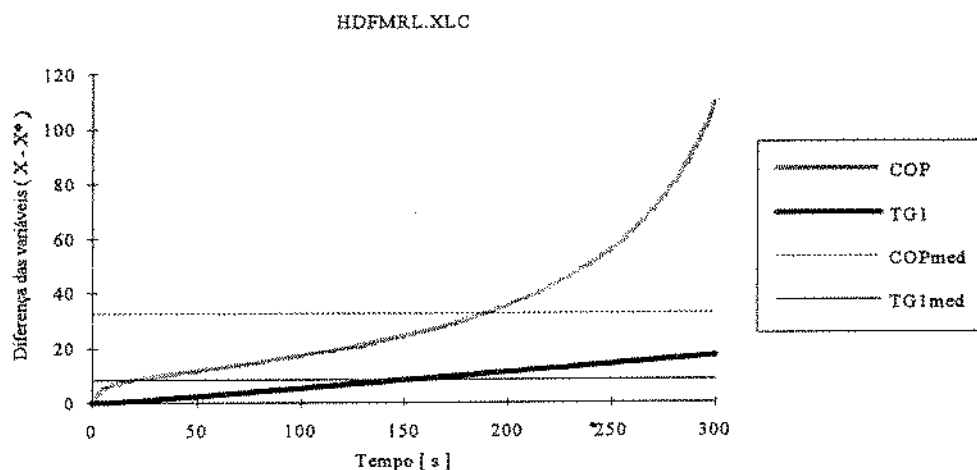


Figura 75 . Histórico das diferenças dos valores das variáveis do processo em relação a seu valor inicial de estado estacionário quando submetido a uma perturbação em degrau de -75 kg/h de vazão mássica de refrigerante.

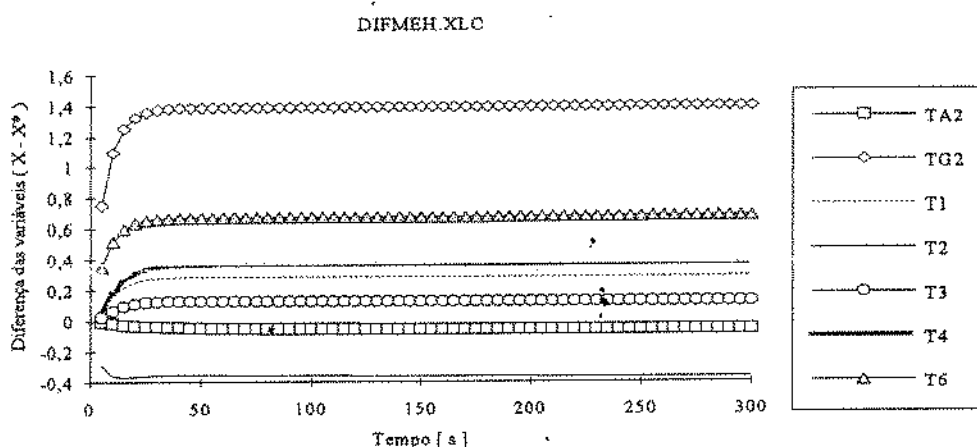


Figura 76 . Histórico das diferenças dos valores das variáveis do processo em relação a seu valor inicial de estado estacionário quando submetido a uma perturbação em degrau de $+250 \text{ kg/h}$ de vazão mássica de etileno glicol.

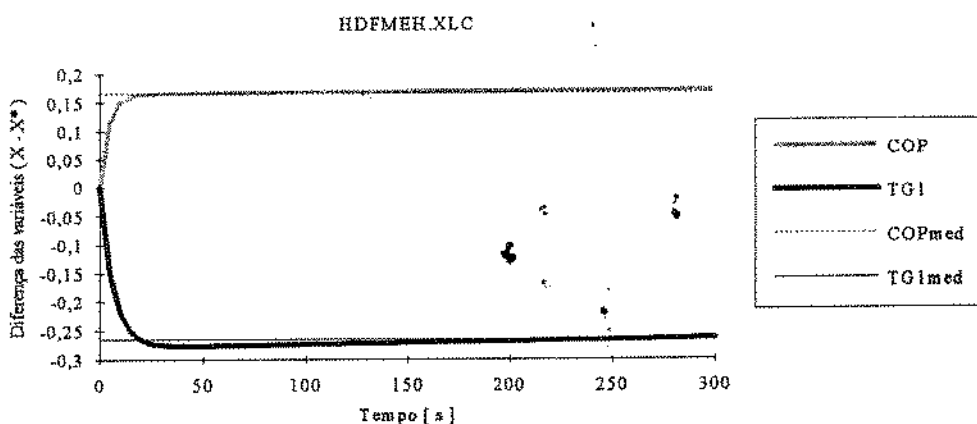


Figura 77 . Histórico das diferenças dos valores das variáveis do processo em relação a seu valor inicial de estado estacionário quando submetido a uma perturbação em degrau de $+250 \text{ kg/h}$ de vazão mássica de etileno glicol.

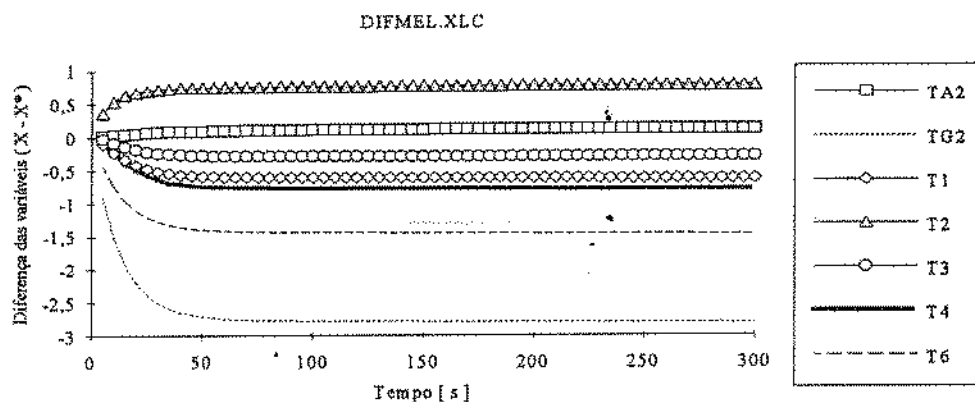


Figura 78 . Histórico das diferenças dos valores das variáveis do processo em relação a seu valor inicial de estado estacionário quando submetido a uma perturbação em degrau de - 250 kg/h de vazão mássica de etileno glicol.

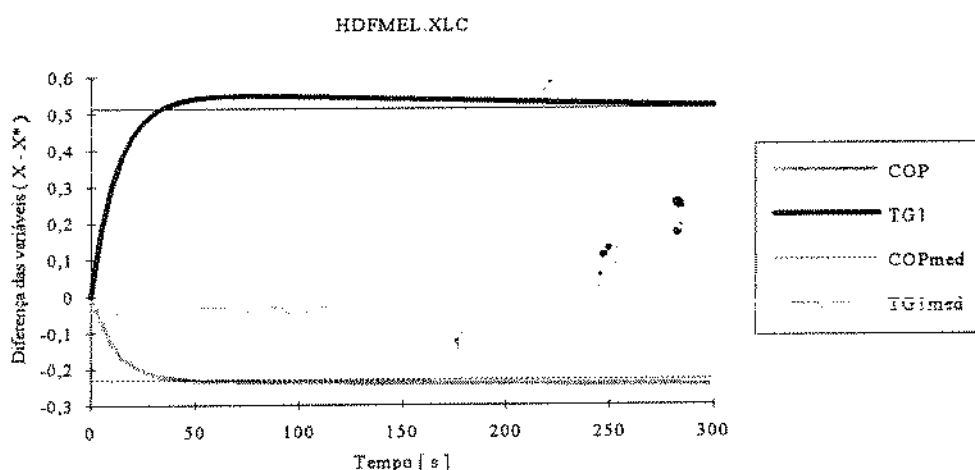


Figura 79 . Histórico das diferenças dos valores das variáveis do processo em relação a seu valor inicial de estado estacionário quando submetido a uma perturbação em degrau de - 250 kg/h de vazão mássica de etileno glicol.

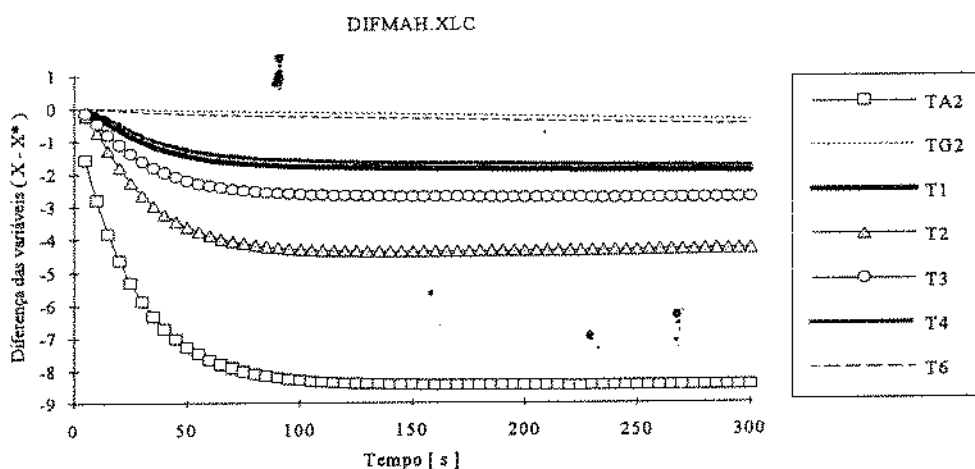


Figura 80 . Histórico das diferenças dos valores das variáveis do processo em relação a seu valor inicial de estado estacionário quando submetido a uma perturbação em degrau de + 200 kg/h de vazão mássica de água na entrada do condensador.

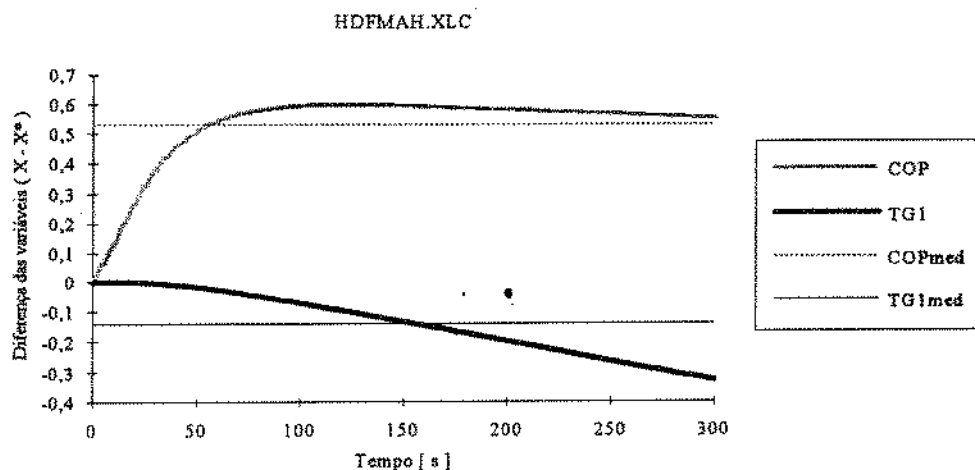


Figura 81 . Histórico das diferenças dos valores das variáveis do processo em relação a seu valor inicial de estado estacionário quando submetido a uma perturbação em degrau de + 200 kg/h de vazão mássica de água.

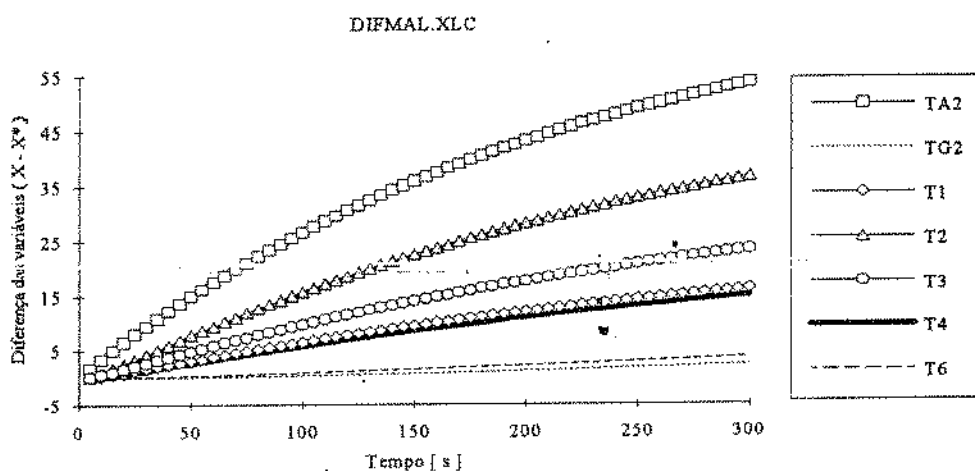


Figura 82 . Histórico das diferenças dos valores das variáveis do processo em relação a seu valor inicial de estado estacionário quando submetido a uma perturbação em degrau de - 200 kg/h de vazão mássica de água.

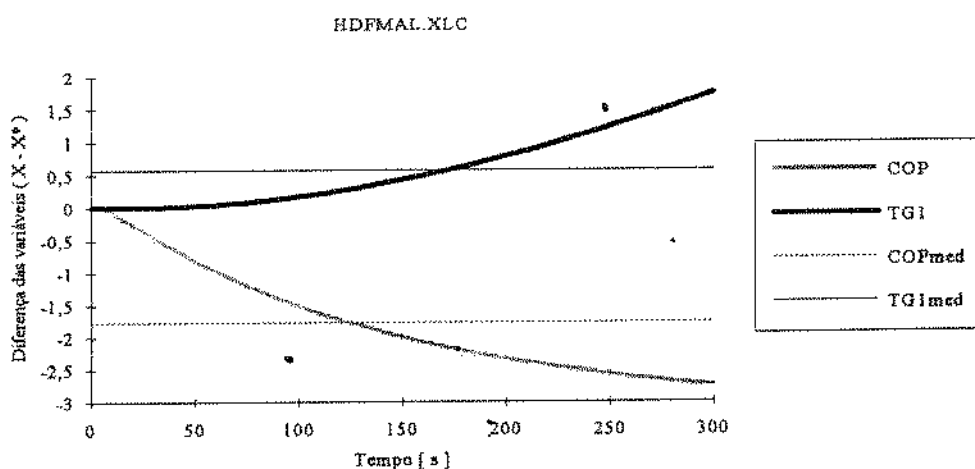


Figura 83 . Histórico das diferenças dos valores das variáveis do processo em relação a seu valor inicial de estado estacionário quando submetido a uma perturbação em degrau de - 200 kg/h de vazão mássica de água .

VI. 5 . RESULTADOS DAS VARIÁVEIS SOB CONTROLE NEBULOSO

VI. 5 . 1 . RESULTADOS DO COMPORTAMENTO DAS VARIÁVEIS SOB CONTROLE NEBULOSO COM DIFERENTES FUNÇÕES DE PERTINÊNCIA.

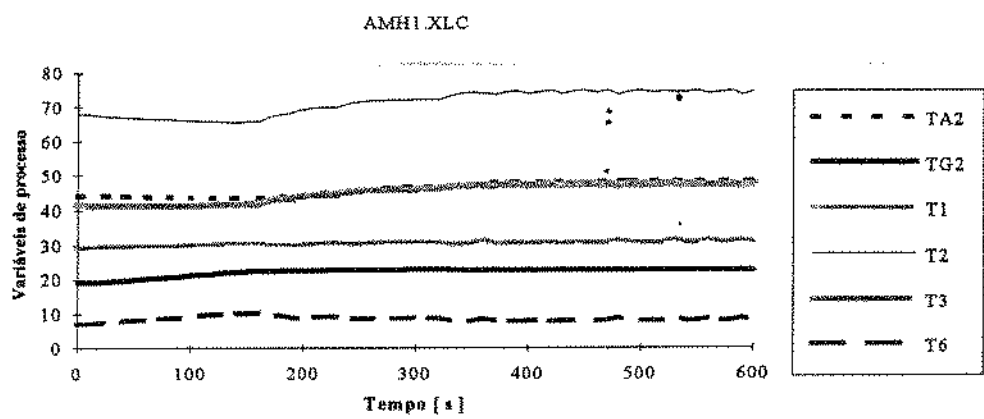


Figura 84 . Históricos dos valores das variáveis de processo sob perturbação em degrau de q_0 de + 3.500 kJ/h com set-point de TG1 = 25,75 ° C , controlado pela Base de Regras “ C . REG ” / Funções de Pertinência da Tabela 23 .

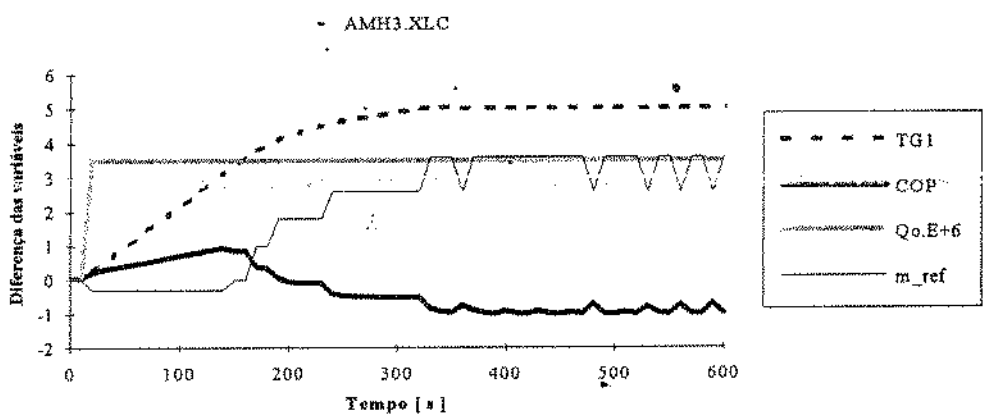


Figura 85 . Históricos das diferenças entre os valores das variáveis de processo e de controle e as condições iniciais sob perturbação em degrau de q_0 de +3.500 kJ/h com set-point de TG1= 25,75 °C, controlado pela Base de Regras “C . REG ” / Funções de Pertinência da Tabela 23 .

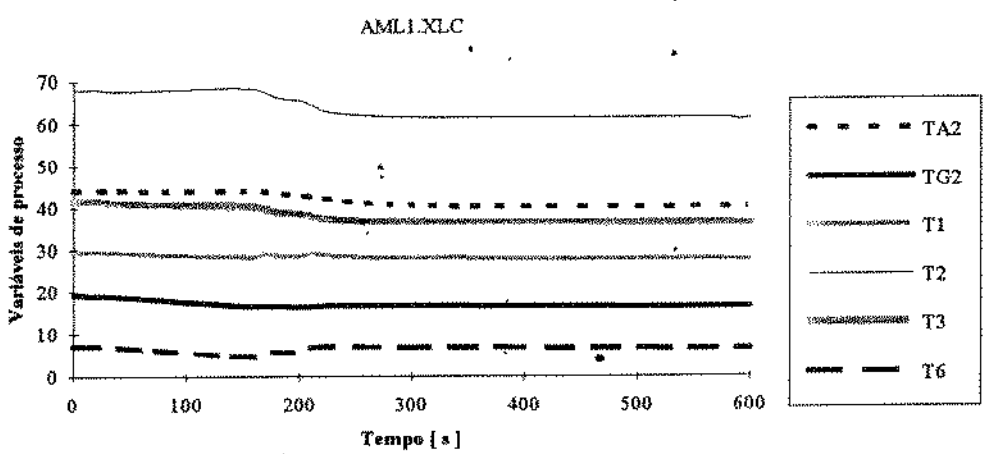


Figura 86 . Históricos dos valores das variáveis de processo sob perturbação em degrau de q_0 de - 3.500 kJ/h com set-point de TG1 = 25,75 ° C , controlado pela Base de Regras “ C . REG ” / Funções de Pertinência da Tabela 23 .

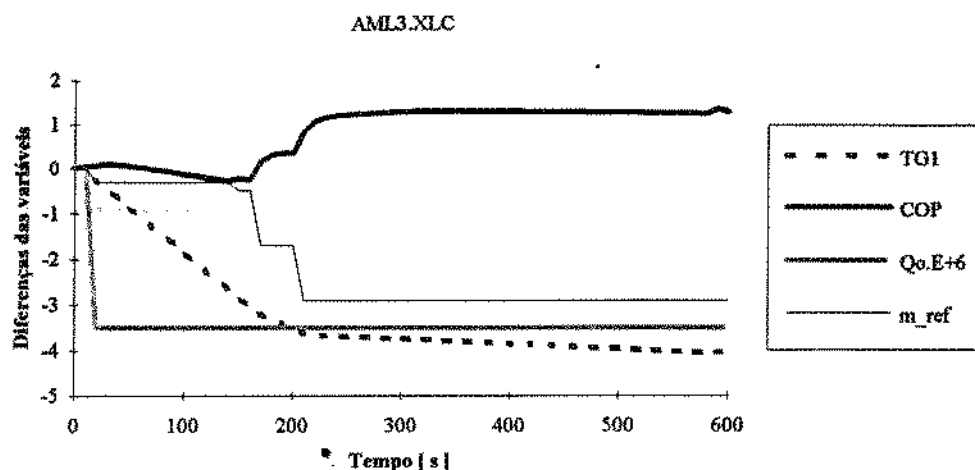


Figura 87 . Históricos das diferenças entre os valores das variáveis de processo e de controle e as condições iniciais sob perturbação em degrau de q_o de -3.500 kJ/h com set-point de $TG1 = 25,75^\circ\text{C}$, controlado pela Base de Regras “C . REG” / Funções de Pertinência da Tabela 23 .

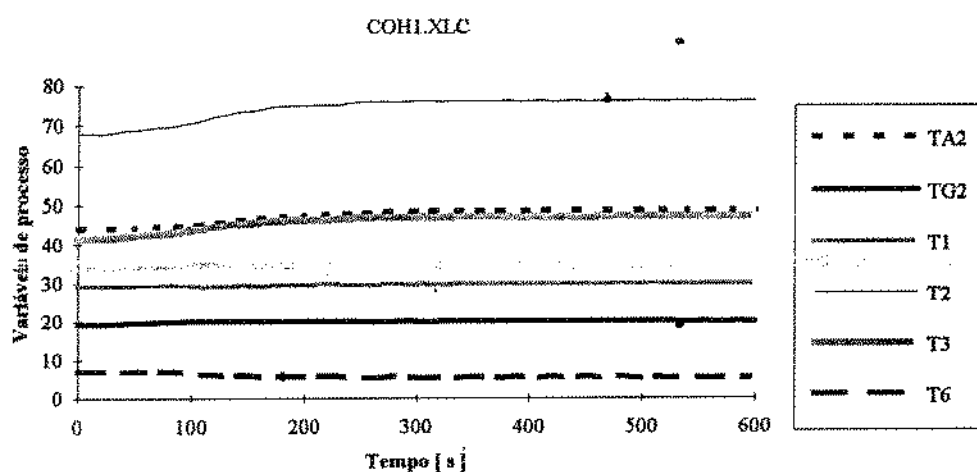


Figura 88 . Históricos dos valores das variáveis de processo sob perturbação em degrau de q_o de $+3.500 \text{ kJ/h}$ com set-point de $TG1 = 25,75^\circ\text{C}$, controlado pela Base de Regras “C . REG” / Funções de Pertinência da Tabela 24 .

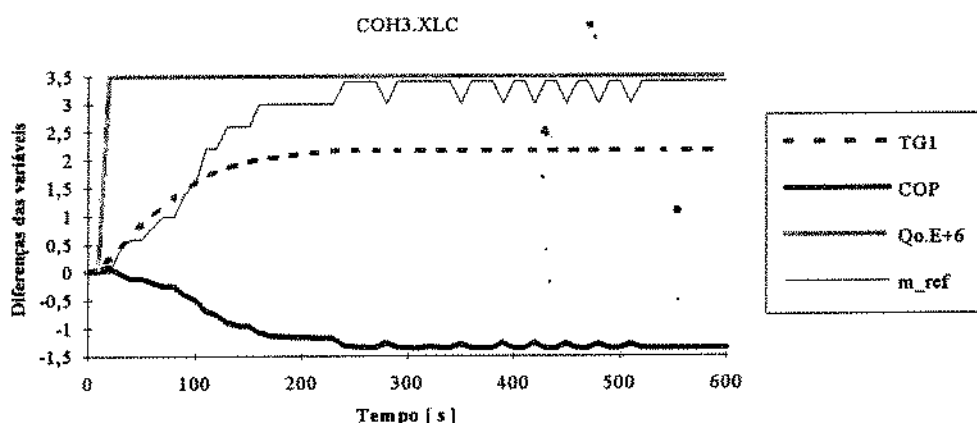


Figura 89 . Históricos das diferenças entre os valores das variáveis de processo e de controle e as condições iniciais sob perturbação em degrau de q_o de $+3.500 \text{ kJ/h}$ com set-point de $TG1 = 25,75^\circ\text{C}$, controlado pela Base de Regras “C . REG” / Funções de Pertinência da Tabela 24 .

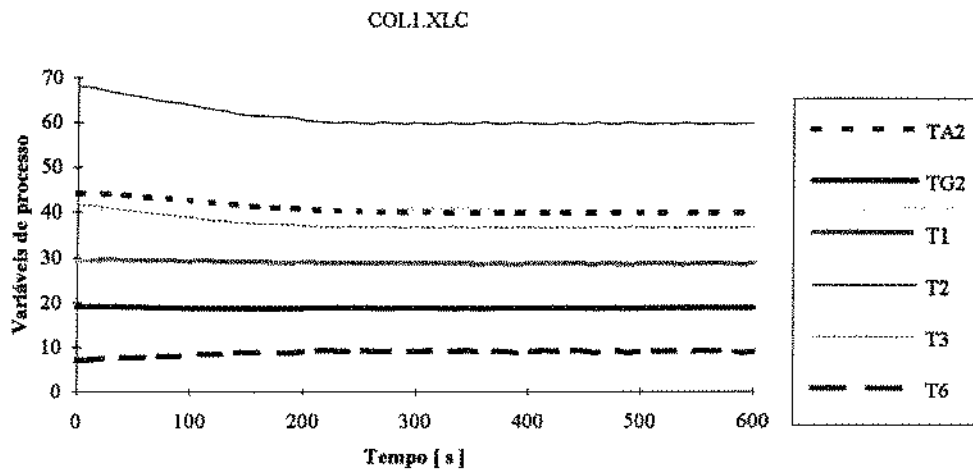


Figura 90 . Históricos dos valores das variáveis de processo sob perturbação em degrau de q_o de - 3.500 kJ/h com set-point de TG1 = 25,75 °C , controlado pela Base de Regras “ C . REG ” / Funções de Pertinência da Tabela 24 .

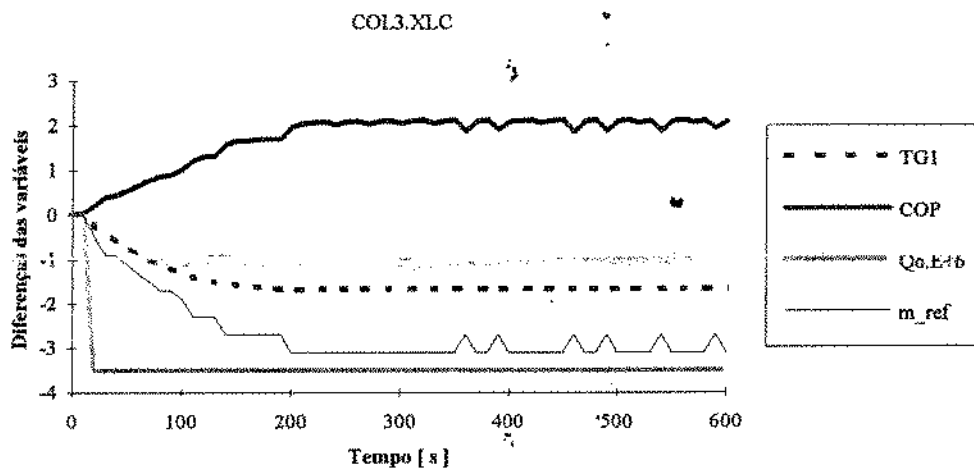


Figura 91 . Históricos das diferenças entre os valores das variáveis de processo e de controle e as condições iniciais sob perturbação em degrau de q_o de - 3.500 kJ/h com set-point de TG1= 25,75 °C, controlado pela Base de Regras “ C . REG ” / Funções de Pertinência da Tabela 24 .

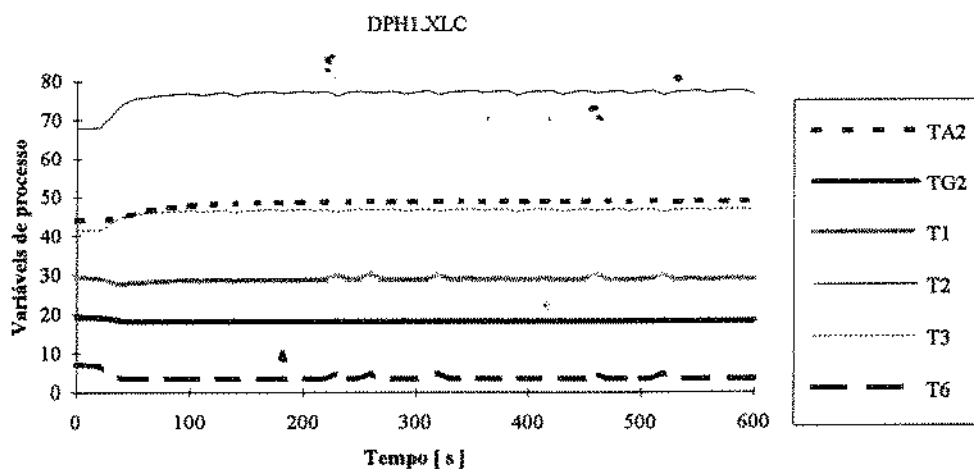


Figura 92 . Históricos dos valores das variáveis de processo sob perturbação em degrau de q_o de + 3.500 kJ/h com set-point de TG1 = 25,75 °C , controlado pela Base de Regras “ C . REG ” / Funções de Pertinência da Tabela 25 .

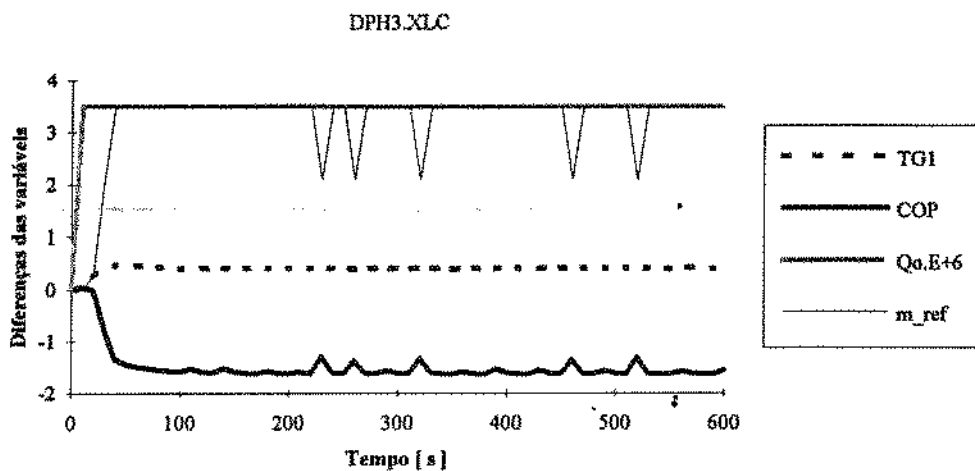


Figura 93 . Históricos das diferenças entre os valores das variáveis de processo e de controle e as condições iniciais sob perturbação em degrau de q_o de +3.500 kJ/h com set-point de $TG1 = 25,75^\circ\text{C}$, controlado pela Base de Regras “C . REG” / Funções de Pertinência da Tabela 25 .

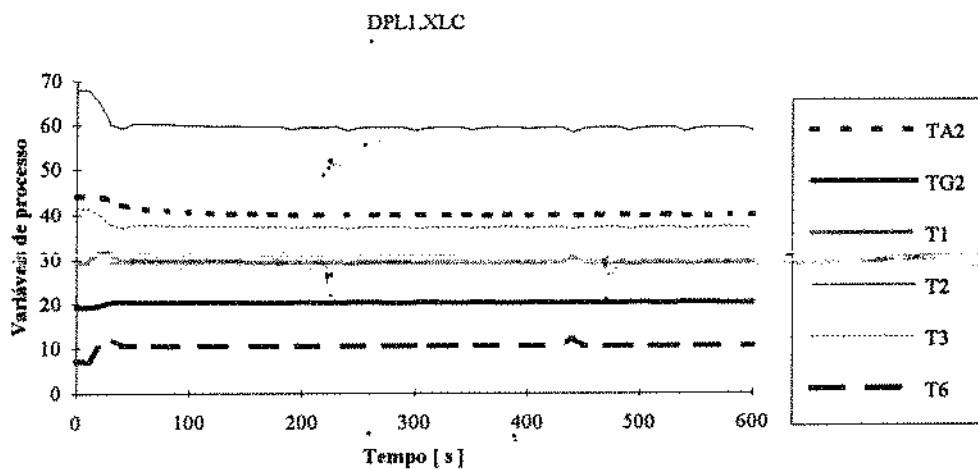


Figura 94 . Históricos dos valores das variáveis de processo sob perturbação em degrau de q_o de -3.500 kJ/h com set-point de $TG1 = 25,75^\circ\text{C}$, controlado pela Base de Regras “C . REG” / Funções de Pertinência da Tabela 25 .

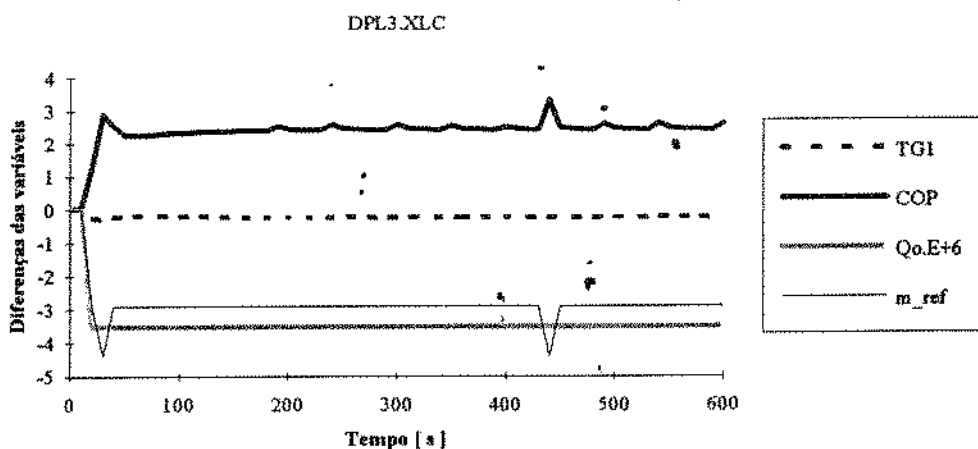


Figura 95 . Históricos das diferenças entre os valores das variáveis de processo e de controle sob perturbação em degrau de q_o de -3.500 kJ/h com set-point de $TG1 = 25,75^\circ\text{C}$, controlado pela Base de Regras “C . REG” / Funções de Pertinência da Tabela 25 .

VI. 5 . 2 . RESULTADOS DO COMPORTAMENTO DAS VARIÁVEIS SOB CONTROLE NEBULOSO COM DIFERENTES BASES DE REGRAS.

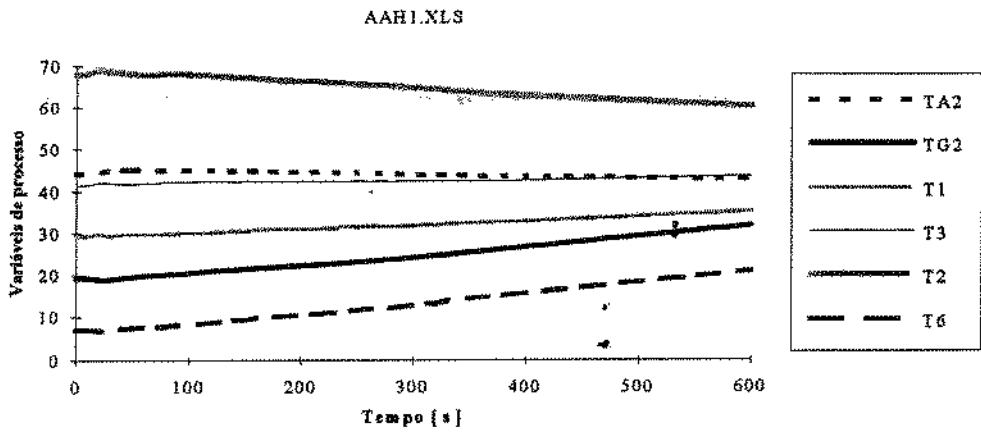


Figura 96 . Históricos dos valores das variáveis de processo sob perturbação em degrau de q_0 de + 3.500 kJ/h com set-point de TG1 = 25,75 ° C , controlado pela Base de Regras “ A . REG ” / Funções de Pertinência da Tabela 25 .

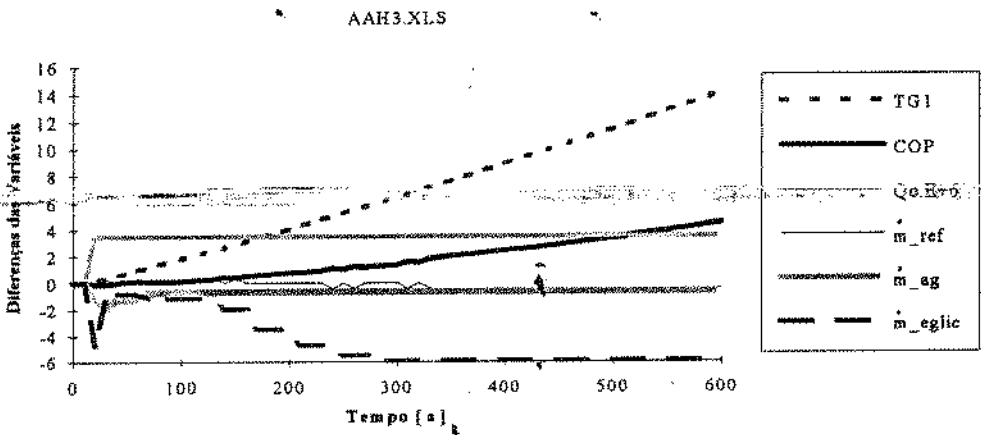


Figura 97 . Históricos das diferenças entre os valores das variáveis de processo e de controle e as condições iniciais sob perturbação em degrau de q_0 de +3.500 kJ/h com set-point de TG1 = 25,75 ° C, controlado pela Base de Regras “A . REG ” / Funções de Pertinência da Tabela 25 .

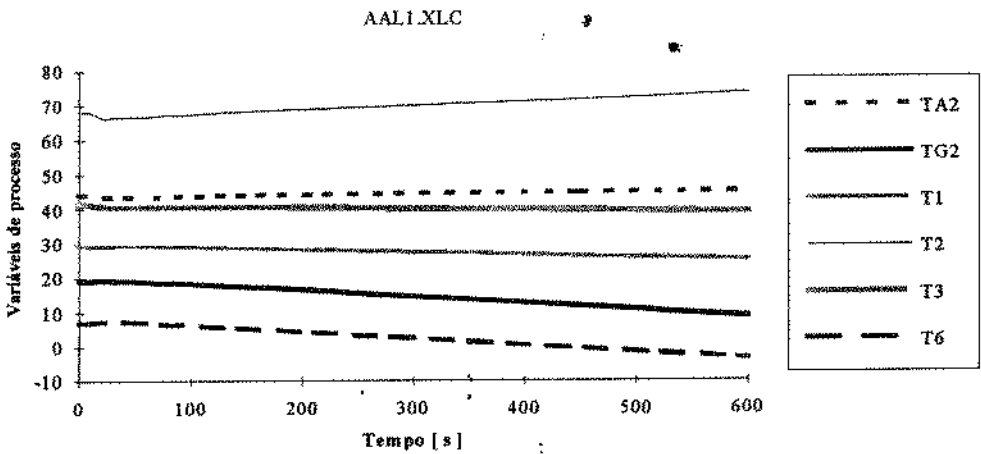


Figura 98 . Históricos dos valores das variáveis do processo sob perturbação em degrau de q_0 de - 3.500 kJ/h com set-point de TG1 = 25,75 ° C , controlado pela Base de Regras “ A . REG ” / Funções de Pertinência da Tabela 25 .

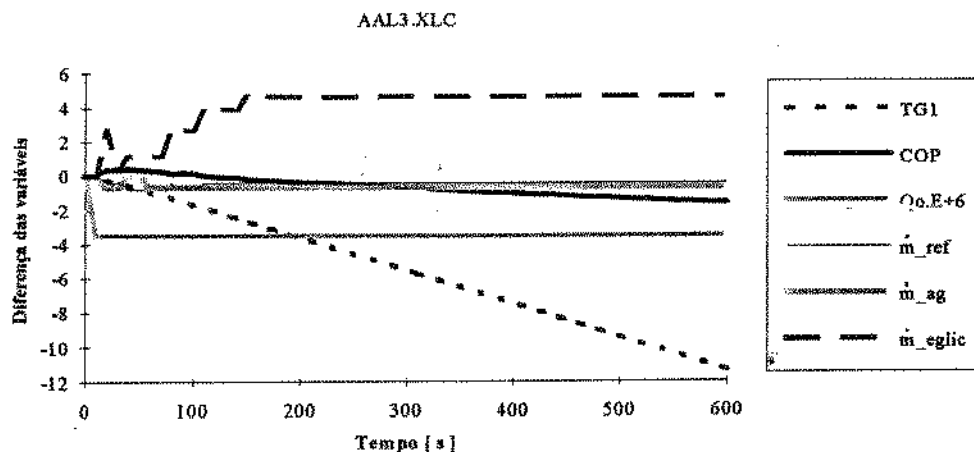


Figura 99 . Históricos das diferenças entre os valores das variáveis de processo e de controle e as condições iniciais sob perturbação em degrau de q_0 de -3.500 kJ/h com set-point de $TG1 = 25,75^\circ\text{C}$, controlado pela Base de Regras “A . REG” / Funções de Pertinência da Tabela 25 .

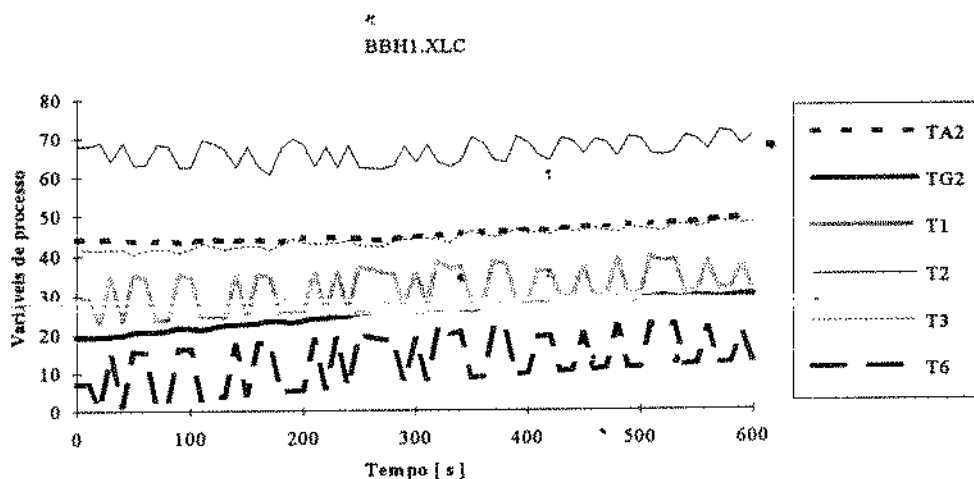


Figura 100 . Históricos dos valores das variáveis do processo sob perturbação em degrau de q_0 de +3.500 kJ/h com set-point de $TG1 = 25,75^\circ\text{C}$, controlado pela Base de Regras “B . REG” / Funções de Pertinência da Tabela 25 .

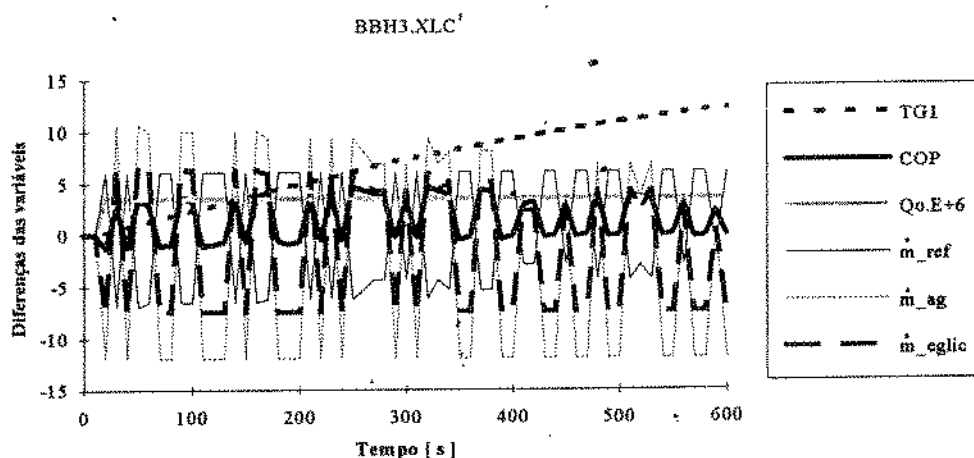


Figura 101 . Históricos das diferenças entre os valores das variáveis de processo e de controle e as condições iniciais sob perturbação em degrau de q_0 de +3.500 kJ/h com set-point de $TG1 = 25,75^\circ\text{C}$, controlado pela Base de Regras “B . REG” / Funções de Pertinência da Tabela 25 .

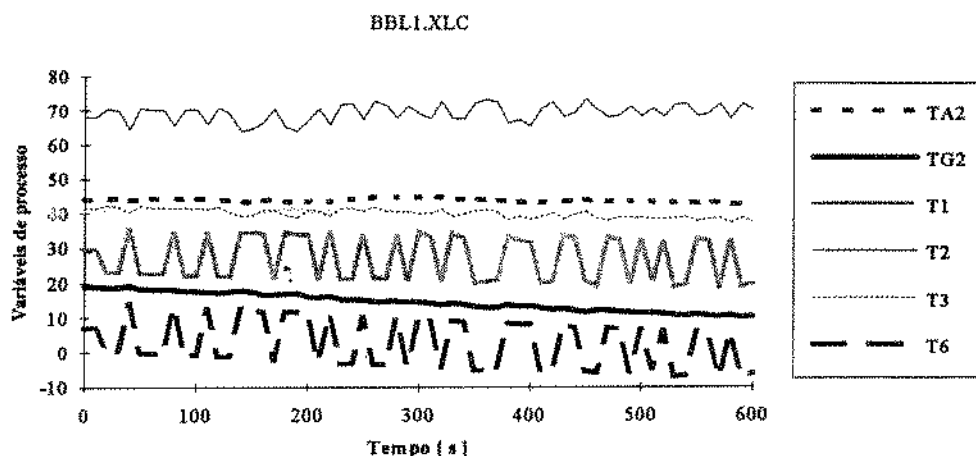


Figura 102 . Históricos dos valores das variáveis do processo sob perturbação em degrau de q_0 de - 3.500 kJ/h com set-point de $TG1 = 25,75^\circ \text{C}$, controlado pela Base de Regras “ B . REG ” / Funções de Pertinência da Tabela 25 .

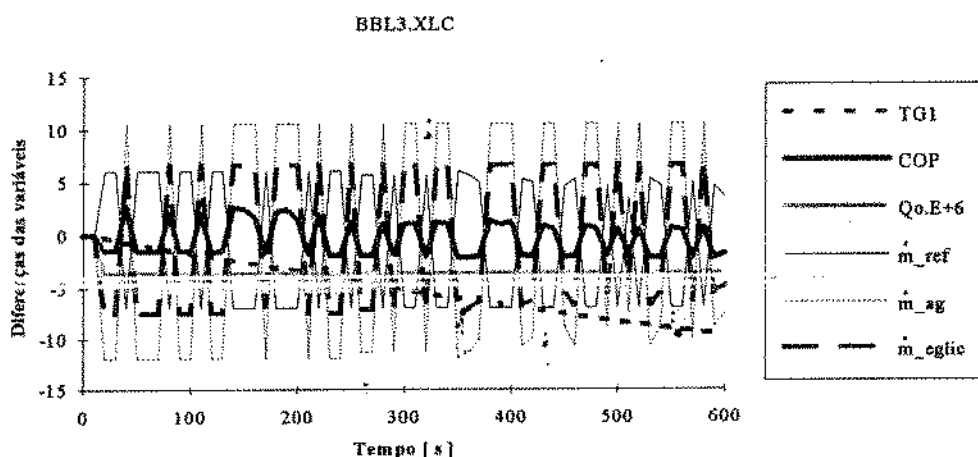


Figura 103 . Históricos das diferenças entre os valores das variáveis de processo e de controle e as condições iniciais sob perturbação em degrau de q_0 de -3.500 kJ/h com set-point de $TG1 = 25,75^\circ \text{C}$, controlado pela Base de Regras “B . REG ” / Funções de Pertinência da Tabela 25 .

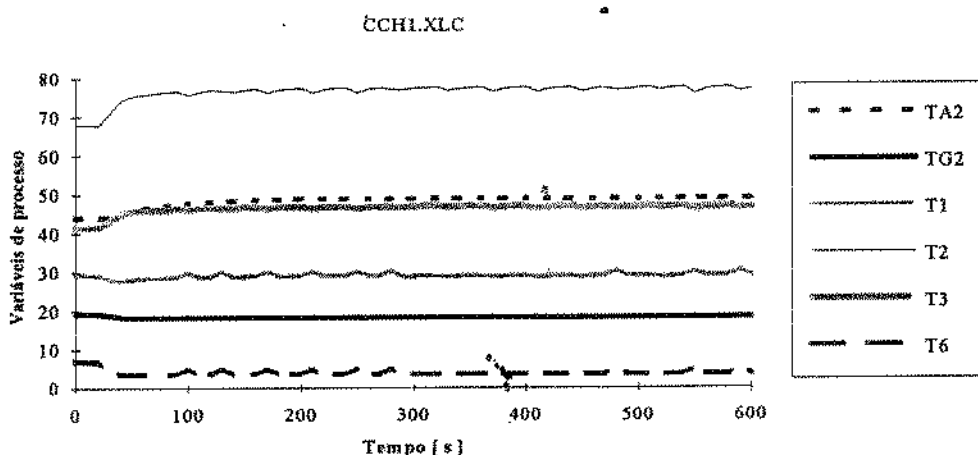


Figura 104 . Históricos dos valores das variáveis do processo sob perturbação em degrau de q_0 de + 3.500 kJ/h com set-point de $TG1 = 25,75^\circ \text{C}$, controlado pela Base de Regras “ C . REG ” / Funções de Pertinência da Tabela 25 .

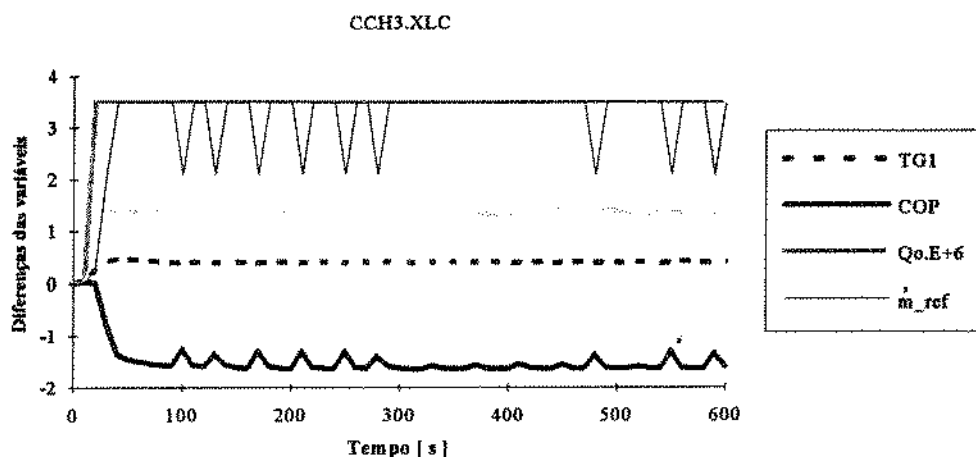


Figura 105 . Históricos das diferenças entre os valores das variáveis de processo e de controle e as condições iniciais sob perturbação em degrau de q_o de +3.500 kJ/h com set-point de TG1 = 25,75 °C, controlado pela Base de Regras “C . REG” / Funções de Pertinência da Tabela 25 .

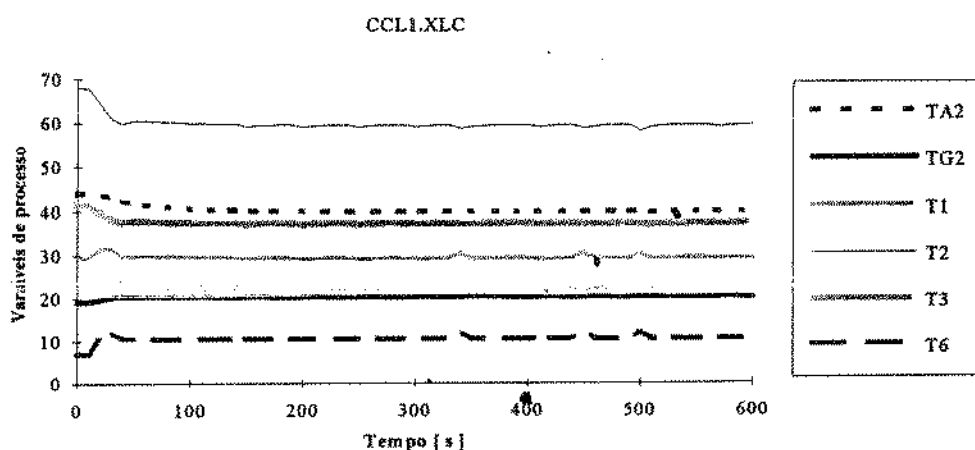


Figura 106 . Históricos dos valores das variáveis do processo sob perturbação em degrau de q_o de - 3.500 kJ/h com set-point de TG1 = 25,75 °C , controlado pela Base de Regras “C . REG” / Funções de Pertinência da Tabela 25 .

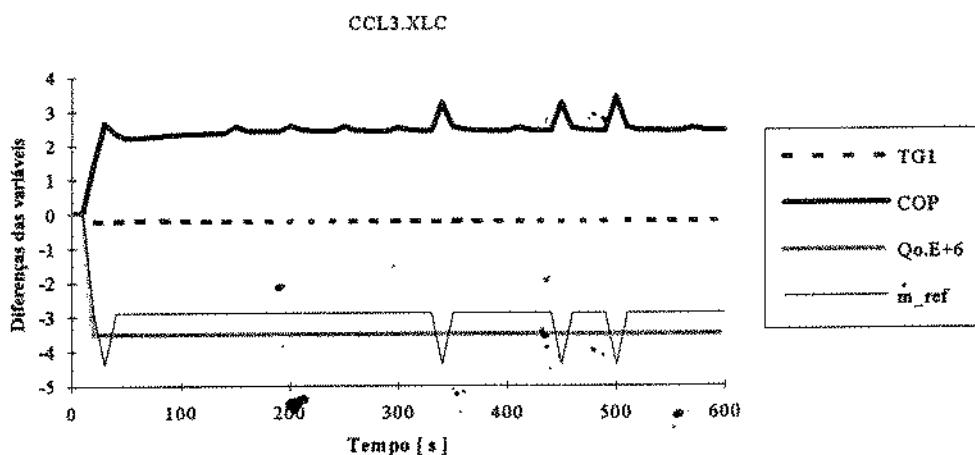


Figura 107 . Históricos das diferenças entre os valores das variáveis de processo e de controle e as condições iniciais sob perturbação em degrau de q_o de -3.500 kJ/h com set-point de TG1 = 25,75 °C, controlado pela Base de Regras “C . REG” / Funções de Pertinência da Tabela 25 .

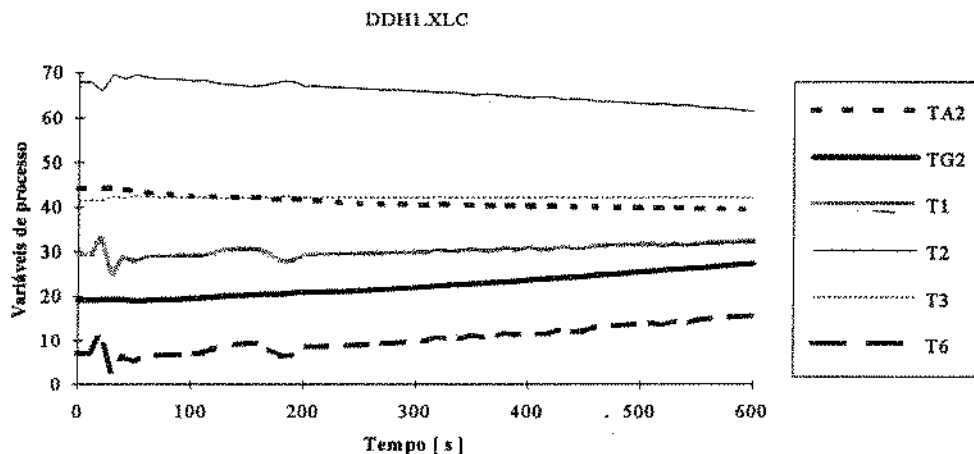


Figura 108 . Históricos dos valores das variáveis do processo sob perturbação em degrau de q_o de + 3.500 kJ/h com set-point de TG1 = 25,75 °C , controlado pela Base de Regras “ D . REG ” / Funções de Pertinência da Tabela 25 .

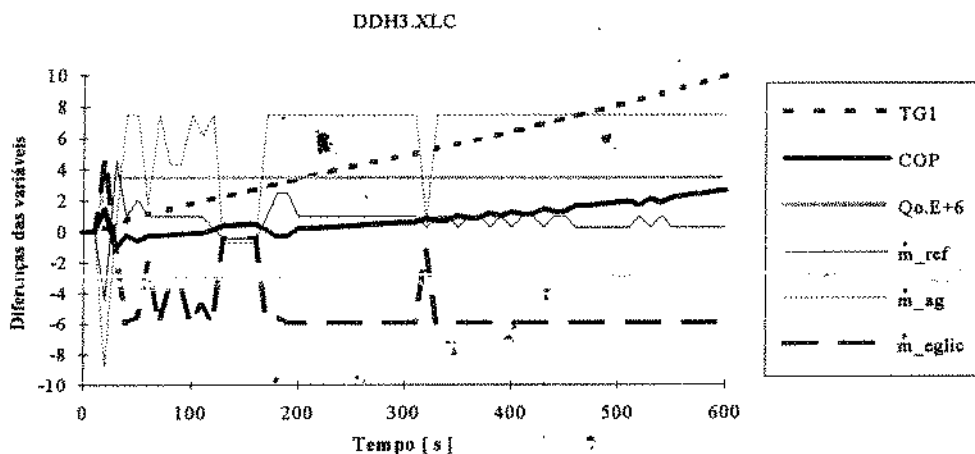


Figura 109 . Históricos das diferenças entre os valores das variáveis de processo e de controle e as condições iniciais sob perturbação em degrau de q_o de +3.500 kJ/h com set-point de TG1 = 25,75 °C, controlado pela Base de Regras “D . REG ” / Funções de Pertinência da Tabela 25 .

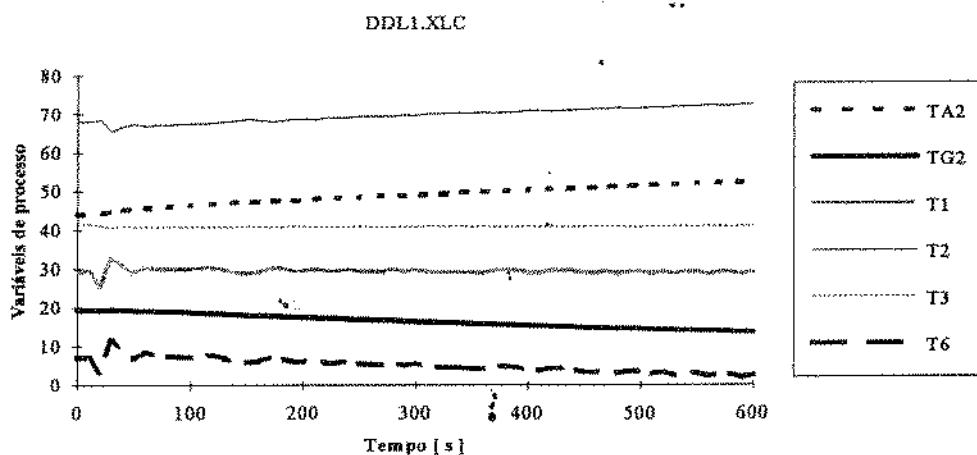


Figura 110 . Históricos dos valores das variáveis do processo sob perturbação em degrau de q_o de - 3.500 kJ/h com set-point de TG1 = 25,75 °C , controlado pela Base de Regras “ D . REG ” / Funções de Pertinência da Tabela 25 .

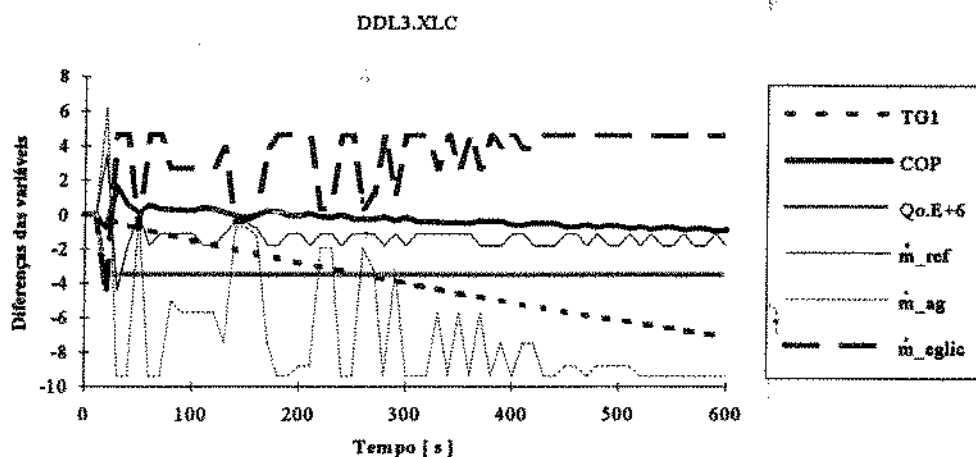


Figura 111 . Históricos das diferenças entre os valores das variáveis de processo e de controle e as condições iniciais sob perturbação em degrau de q_o de -3.500 kJ/h com set-point de TG1 = 25,75 °C, controlado pela Base de Regras “D . REG” / Funções de Pertinência da Tabela 25 .

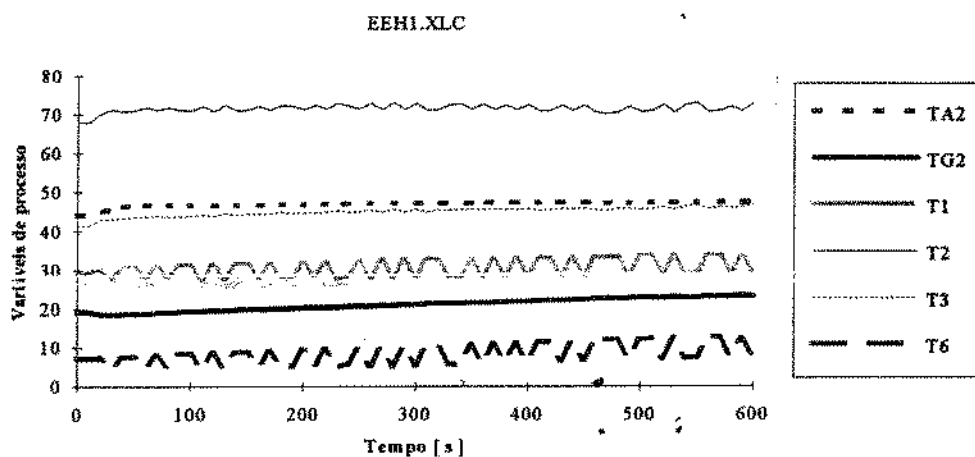


Figura 112 . Históricos dos valores das variáveis do processo sob perturbação em degrau de q_o de + 3.500 kJ/h com set-point de TG1 = 25,75 °C , controlado pela Base de Regras “E . REG” / Funções de Pertinência da Tabela 25 .

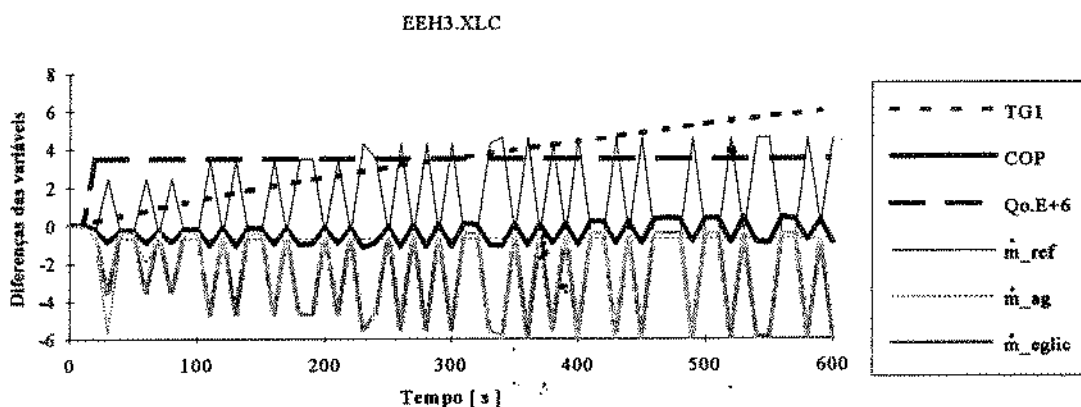


Figura 113 . Históricos das diferenças entre os valores das variáveis de processo e de controle e as condições iniciais sob perturbação em degrau de q_o de +3.500 kJ/h com set-point de TG1 = 25,75 °C, controlado pela Base de Regras “E . REG” / Funções de Pertinência da Tabela 25 .

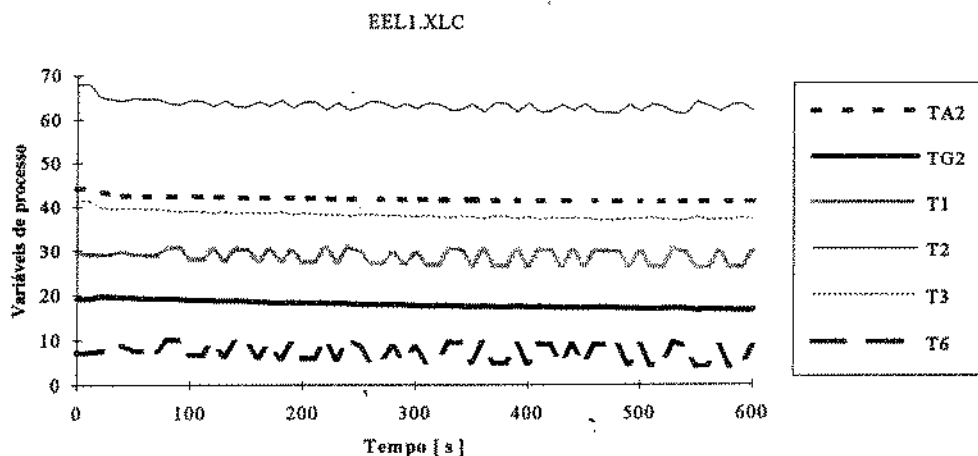


Figura 114 . Históricos dos valores das variáveis do processo sob perturbação em degrau de q_o de - 3.500 kJ/h com set-point de $TG1 = 25,75^{\circ}C$, controlado pela Base de Regras “ E . REG ” / Funções de Pertinência da Tabela 25 .

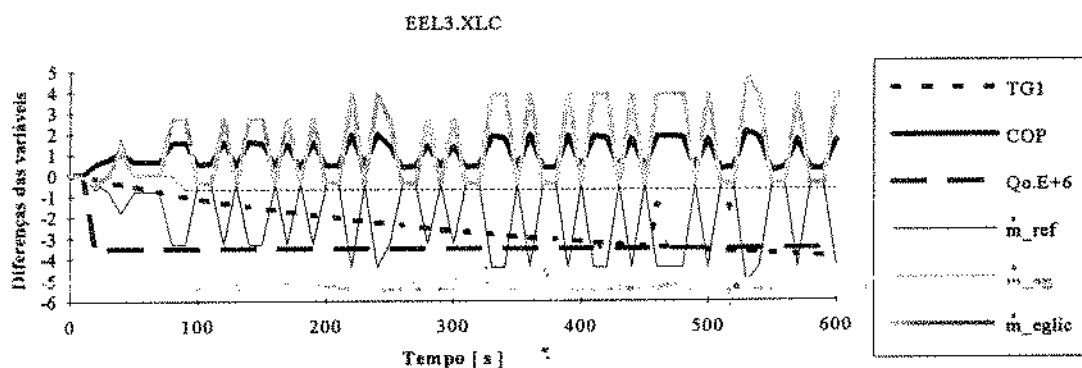


Figura 115 . Históricos das diferenças entre os valores das variáveis de processo e de controle e as condições iniciais sob perturbação em degrau de q_o de - 3.500 kJ/h com set-point de $TG1 = 25,75^{\circ}C$, controlado pela Base de Regras “E . REG ” / Funções de Pertinência da Tabela 25 .

VI. 5 . 3 . RESULTADOS DO COMPORTAMENTO DAS VARIÁVEIS SOB CONTROLE NEBULOSO COM DIFERENTES SET_POINTS.

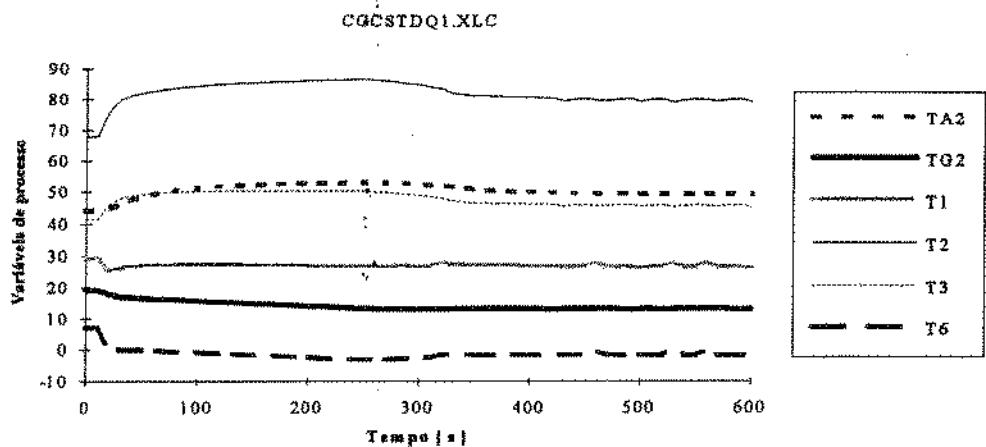


Figura 116 . Históricos dos valores das variáveis de processo sob perturbação em degrau de q_0 de + 3.500 kJ/h com set-point de TG1 = 20,75 ° C , controlado pela Base de Regras “ C . REG ” / Funções de Pertinência da Tabela 25 .

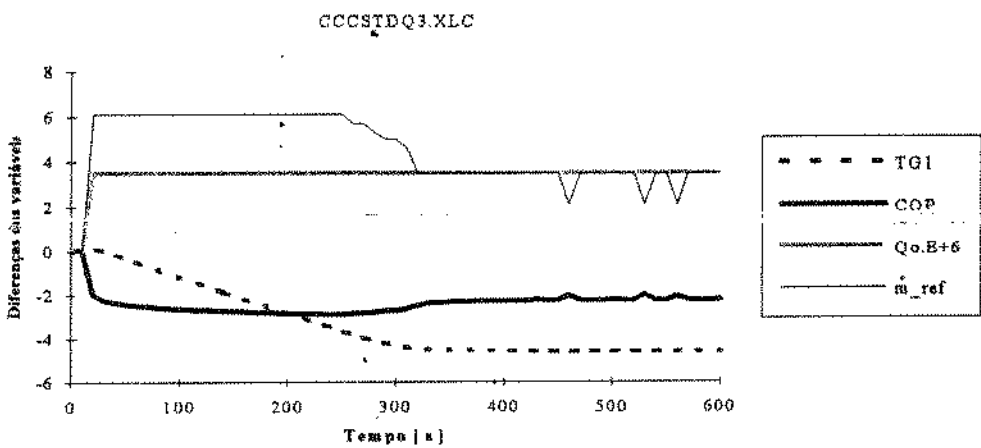


Figura 117 . Históricos das diferenças entre os valores das variáveis de processo e de controle e as condições iniciais sob perturbação em degrau de q_0 de +3.500 kJ/h com set-point de TG1 = 20,75 °C, controlado pela Base de Regras “C . REG ” / Funções de Pertinência da Tabela 25 .

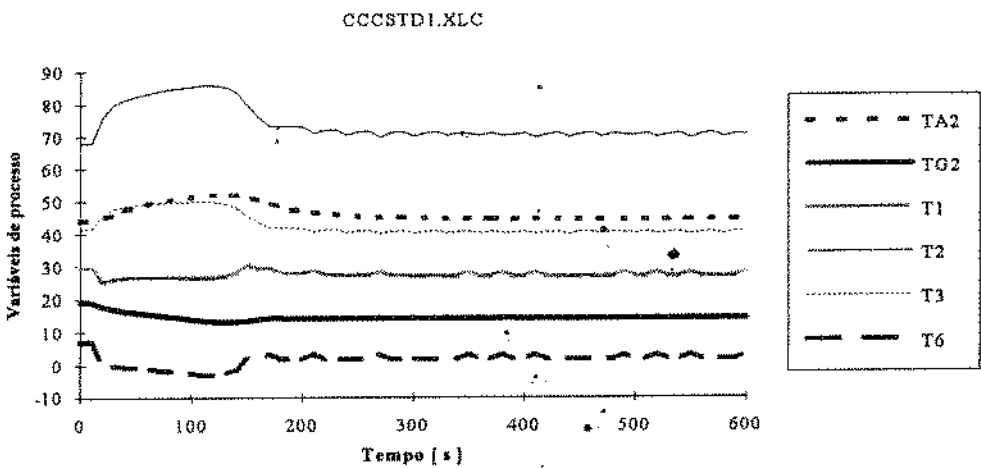


Figura 118 . Históricos dos valores das variáveis do processo sem perturbação com set-point de TG1 = 20,75 °C, controlado pela Base de Regras “ C . REG ” / Funções de Pertinência da Tabela 25

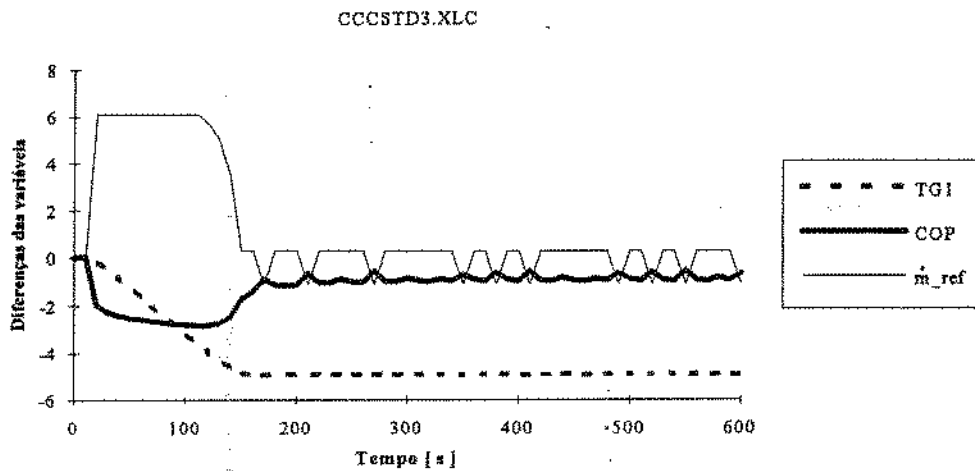


Figura 119 . Históricos das diferenças entre os valores das variáveis de processo e de controle e as condições iniciais sem perturbação com set-point de $TG1 = 20,75^{\circ}C$, controlado pela Base de Regras “C . REG” / Funções de Pertinência da Tabela 25 .

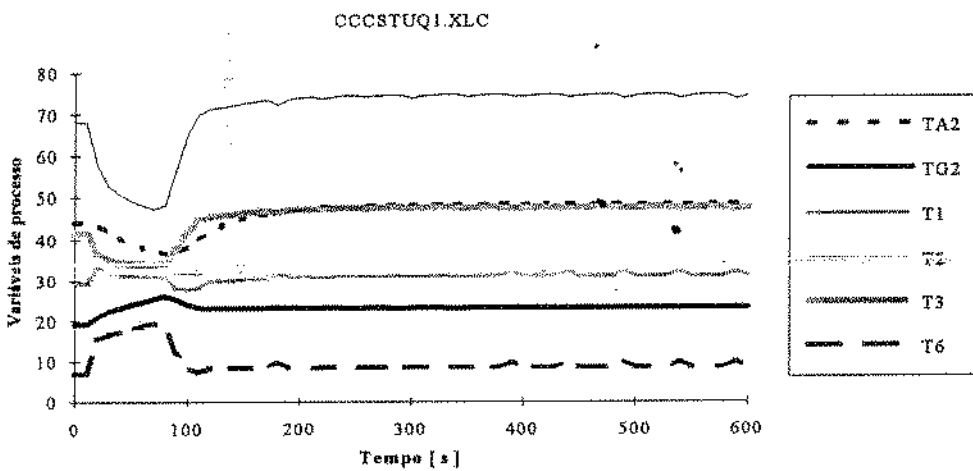


Figura 120 . Históricos dos valores das variáveis do processo sob perturbação em degrau de q_o de $+3.500 \text{ kJ/h}$ com set-point de $TG1 = 30,75^{\circ}C$, controlado pela Base de Regras “C . REG” / Funções de Pertinência da Tabela 25 .

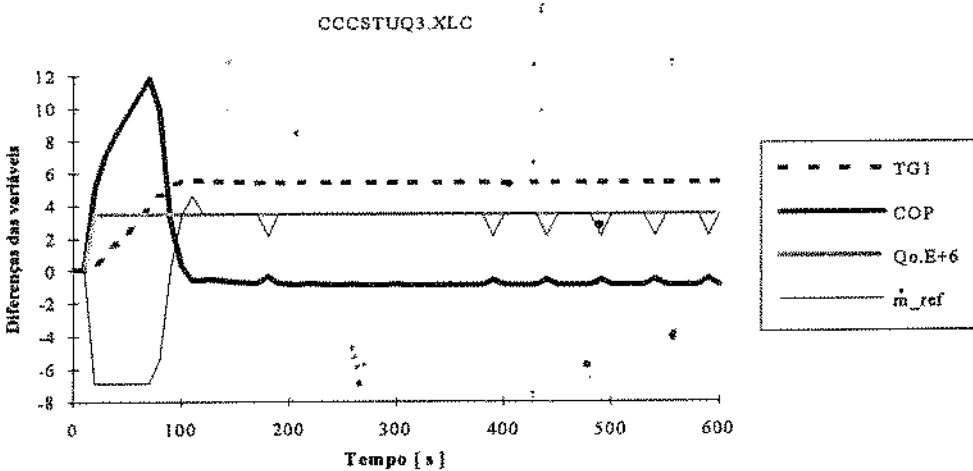


Figura 121 . Históricos das diferenças entre os valores das variáveis de processo e de controle e as condições iniciais sob perturbação em degrau de q_o de $+3.500 \text{ kJ/h}$ com set-point de $TG1 = 30,75^{\circ}C$, controlado pela Base de Regras “C . REG” / Funções de Pertinência da Tabela 25 .

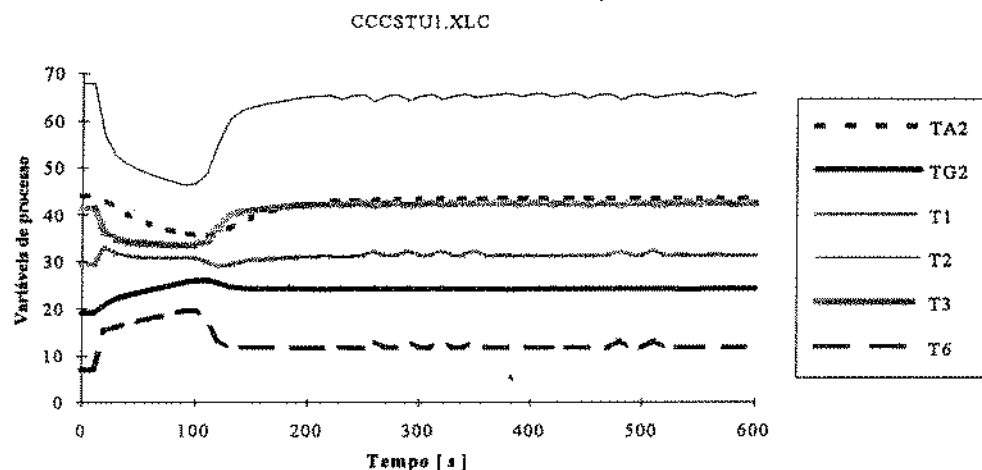


Figura 122 . Históricos dos valores das variáveis do processo sem perturbação com set-point de $TG1 = 30,75^{\circ}\text{C}$, controlado pela Base de Regras " C . REG " / Funções de Pertinência da Tabela 25

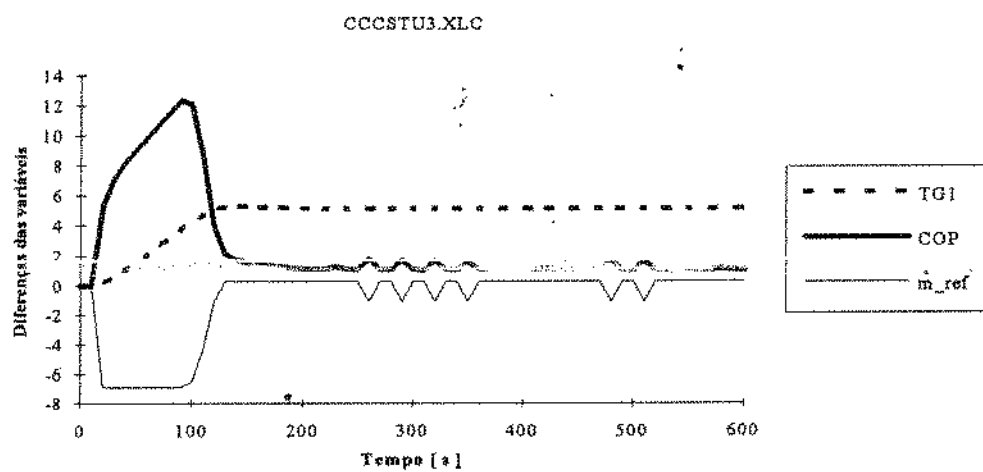


Figura 123 . Históricos das diferenças entre os valores das variáveis de processo e de controle e as condições iniciais sem perturbação com set-point de $TG1 = 30,75^{\circ}\text{C}$, controlado pela Base de Regras " C . REG " / Funções de Pertinência da Tabela 25 .

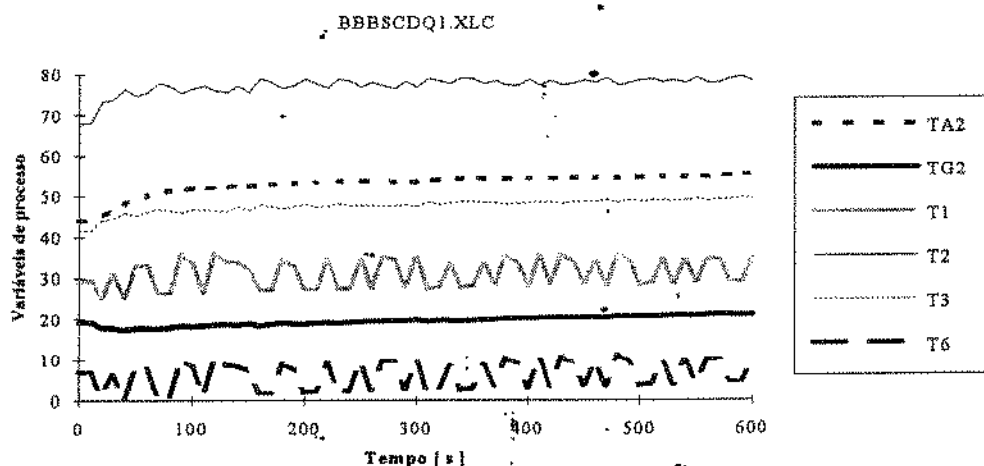


Figura 124 . Históricos dos valores das variáveis do processo sob perturbação em degrau de q_o de $+ 3.500\text{ kJ/h}$ com set-point de $COP = 4,94$, controlado pela Base de Regras " B . REG " / Funções de Pertinência da Tabela 25 .

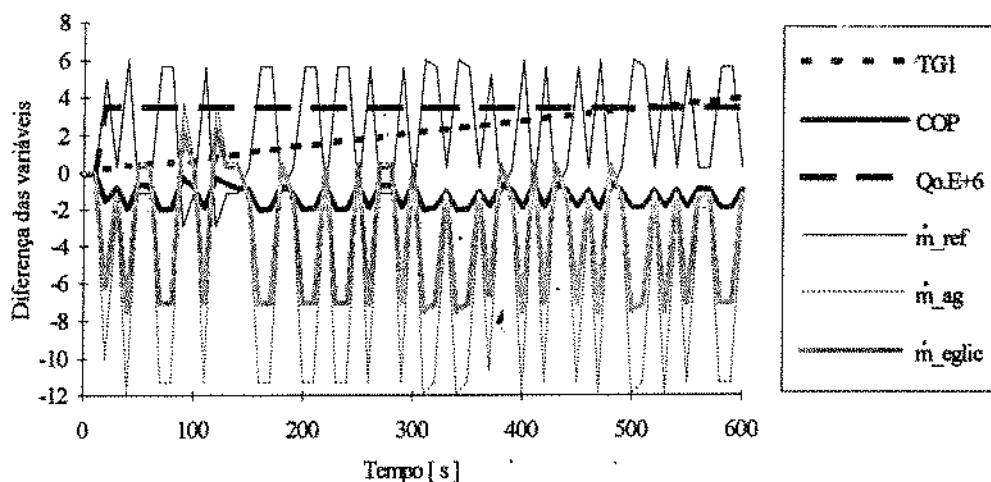


Figura 125 . Históricos das diferenças entre os valores das variáveis de processo e de controle e as condições iniciais sob perturbação em degrau de q_o de + 3.500 kJ/h com set-point de COP = 4,94 , controlado pela Base de Regras “ B . REG ” / Funções de Pertinência da Tabela 25 .

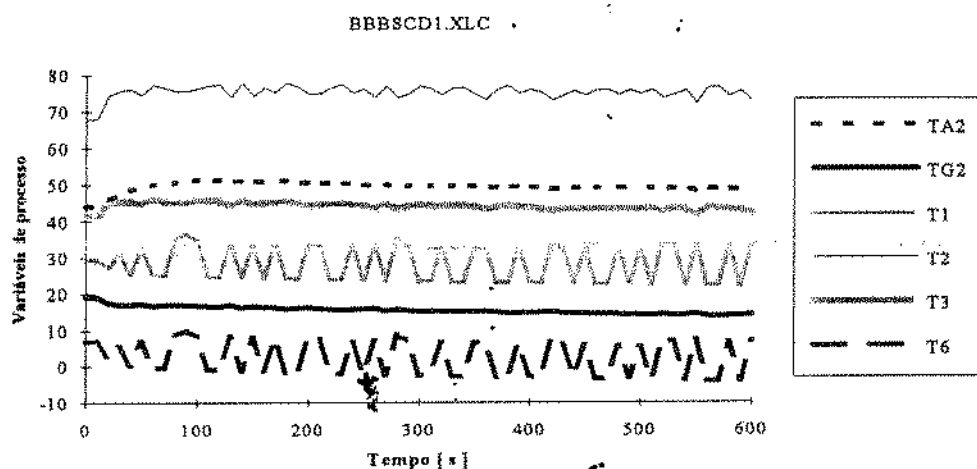


Figura 126 . Históricos dos valores das variáveis do processo sem perturbação com set-point de COP = 4,94, controlado pela Base de Regras “ B . REG ” / Funções de Pertinência da Tabela 25 .

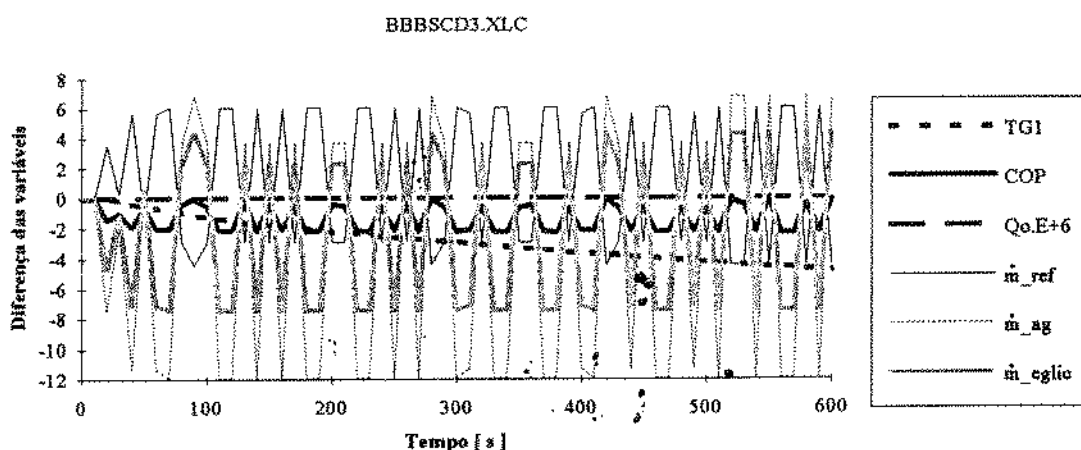


Figura 127 . Históricos das diferenças entre os valores das variáveis de processo e de controle e as condições iniciais sem perturbação com set-point de COP = 4,94 , controlado pela Base de Regras “ B . REG ” / Funções de Pertinência da Tabela 25 .

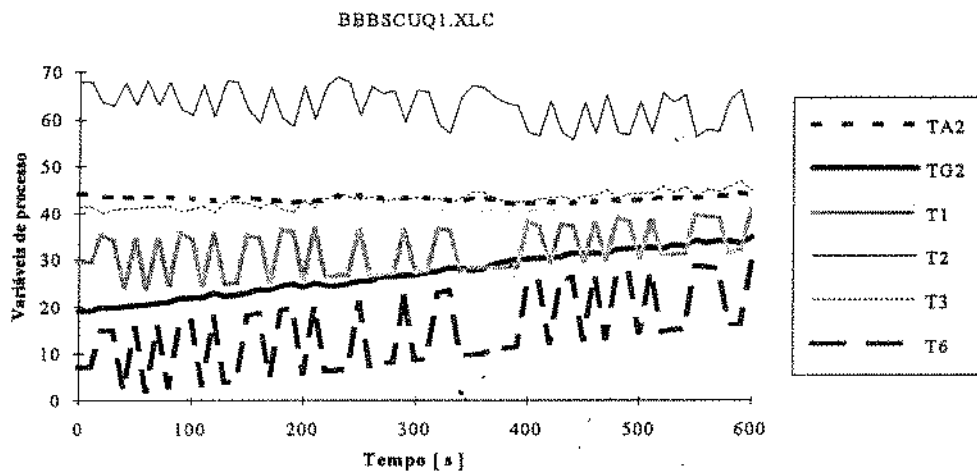


Figura 128 . Históricos dos valores das variáveis do processo sob perturbação em degrau de q_o de + 3.500 kJ/h com set-point de COP = 8,94 , controlado pela Base de Regras “ B . REG ” / Funções de Pertinência da Tabela 25 .

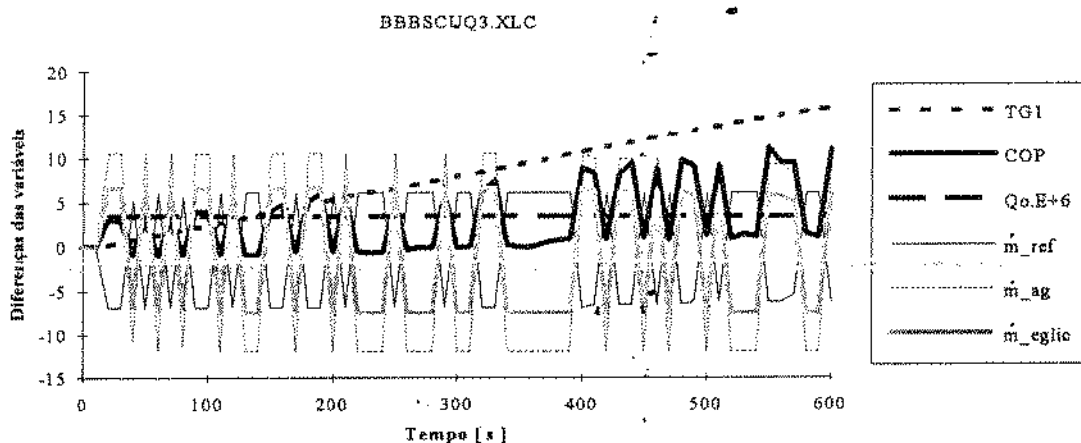


Figura 129 . Históricos das diferenças entre os valores das variáveis de processo e de controle e as condições iniciais sob perturbação em degrau de q_o de + 3.500 kJ/h com set-point de COP = 8,94 , controlado pela Base de Regras “ B . REG ” / Funções de Pertinência da Tabela 25 .

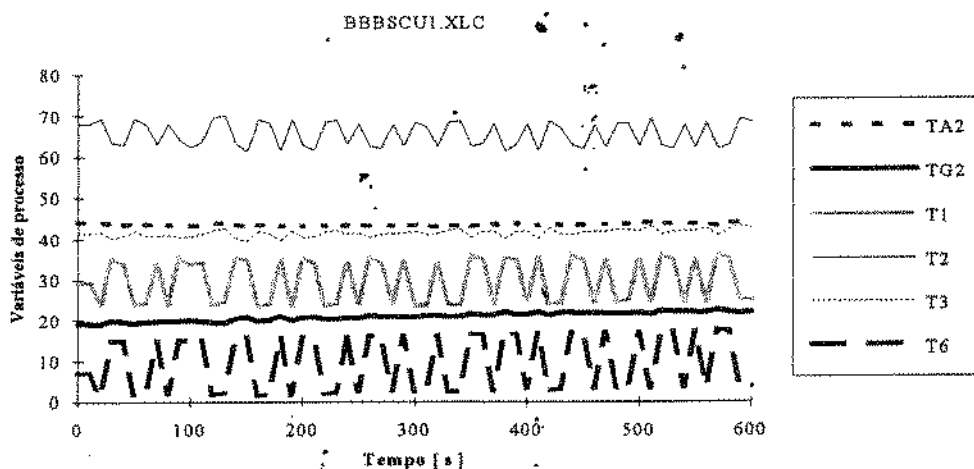


Figura 130 . Históricos dos valores das variáveis do processo sem perturbação com set-point de COP = 8,94 , controlado pela Base de Regras “ B . REG ” / Funções de Pertinência da Tabela 25 .

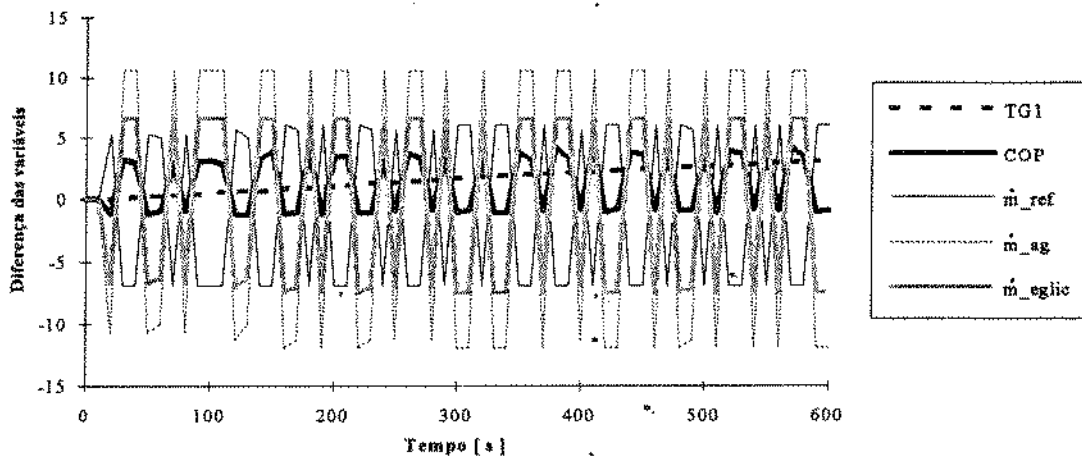


Figura 131 . Históricos das diferenças entre os valores das variáveis de processo e de controle e as condições iniciais sem perturbação com set-point de $COP = 8,94$, controlado pela Base de Regras “B . REG ” / Funções de Pertinência da Tabela 25 .

VI. 6 . COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS ENTRE DIFERENTES CONTROLES

VI . 6 . 1 . COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DAS VARIÁVEIS SOB CONTROLE NEBULOSO COM DIFERENTES FUNÇÕES DE PERTINÊNCIA.

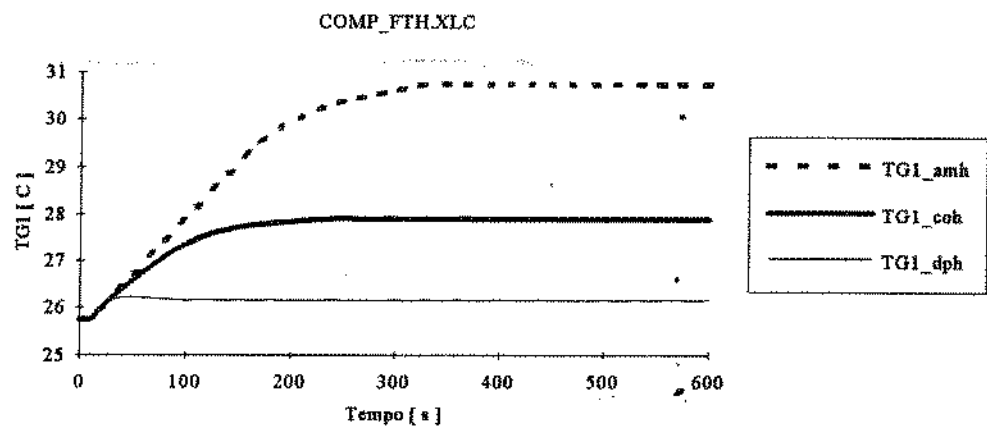


Figura 132 . Históricos dos valores da variável de processo (TG1) sob perturbação em degrau de q_o de + 3.500 kJ/h com set-point de TG1 = 25,75 ° C , controlado com diferentes funções de pertinência.

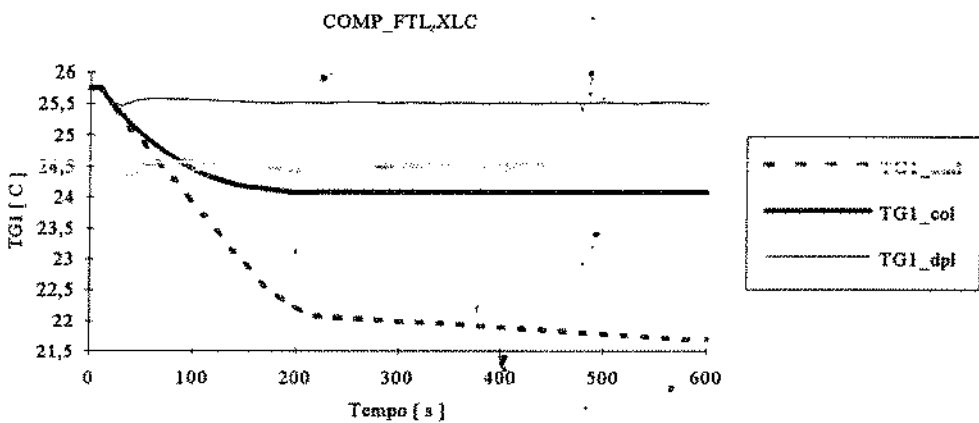


Figura 133 . Históricos dos valores da variável de processo (TG1) sob perturbação em degrau de q_o de - 3.500 kJ/h com set-point de TG1 = 25,75 ° C , controlado com diferentes funções de pertinência.

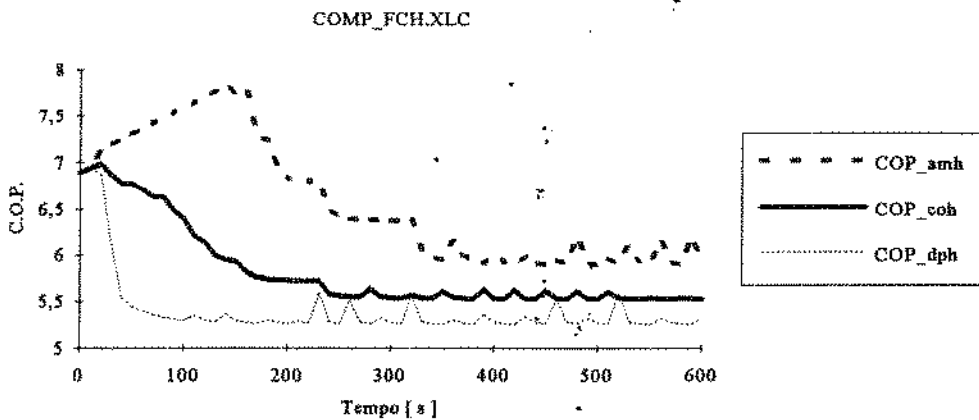


Figura 134 . Históricos dos valores da variável de processo (COP) sob perturbação em degrau de q_o de + 3.500 kJ/h com set-point de TG1 = 25,75 ° C , controlado com diferentes funções de pertinência.

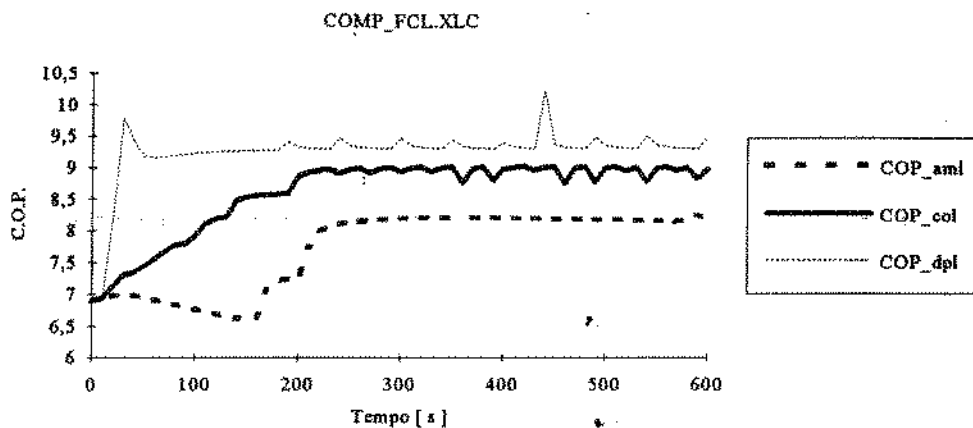


Figura 135 . Históricos dos valores da variável de processo (COP) sob perturbação em degrau de q_o de - 3.500 kJ/h com set-point de $TG1 = 25,75^{\circ}C$, controlado com diferentes funções de pertinência.

VI . 6 . 2 . COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DAS VARIÁVEIS SOB CONTROLE NEBULOSO COM DIFERENTES BASES DE REGRAS.

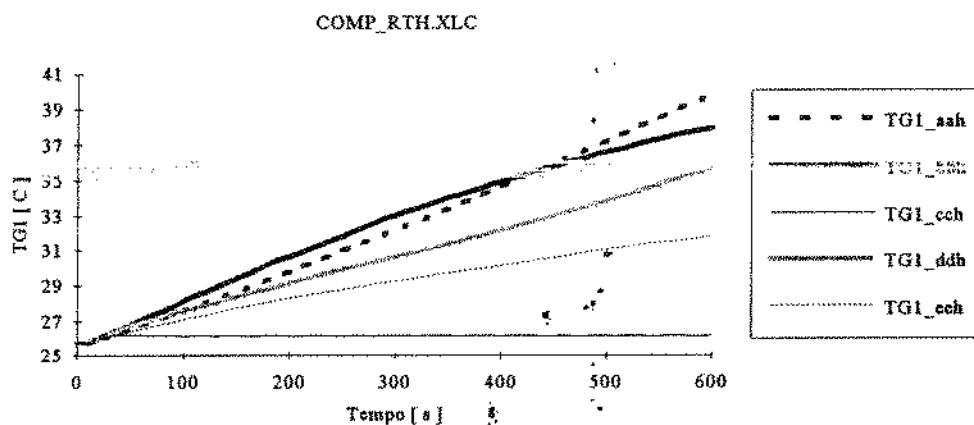


Figura 136 . Históricos dos valores da variável de processo (TG1) sob perturbação em degrau de q_o de + 3.500 kJ/h com set-point de $TG1 = 25,75^{\circ}C$, controlado por diferentes bases de regras .

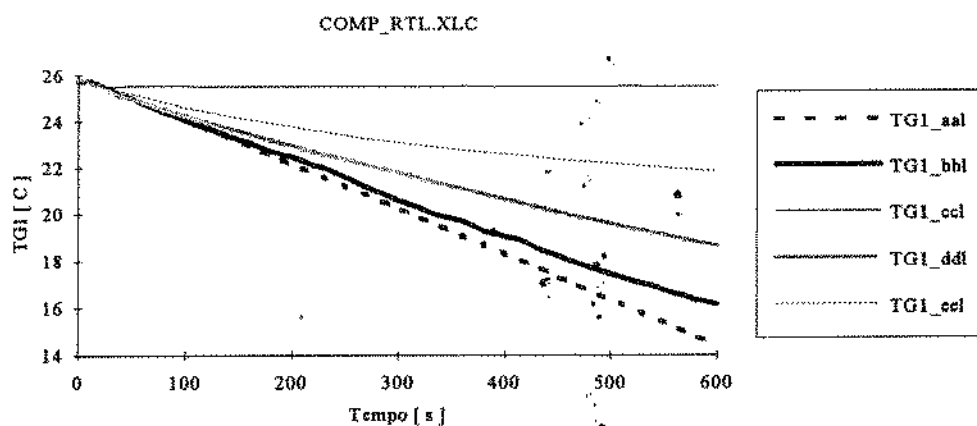


Figura 137 . Históricos dos valores da variável de processo (TG1) sob perturbação em degrau de q_o de - 3.500 kJ/h com set-point de $TG1 = 25,75^{\circ}C$, controlado por diferentes bases de regras .

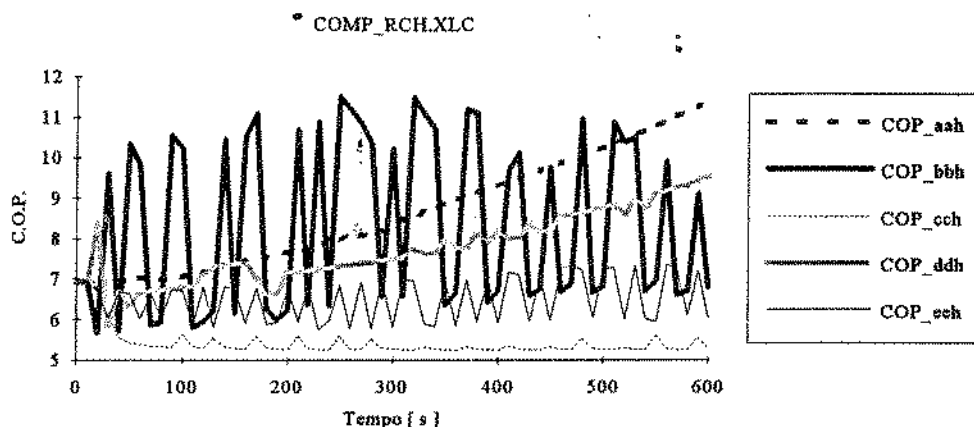


Figura 138 . Históricos dos valores da variável de processo (COP) sob perturbação em degrau de q_0 de + 3.500 kJ/h com set-point de $TG1 = 25,75 \text{ } ^\circ\text{C}$, controlado por diferentes bases de regras .

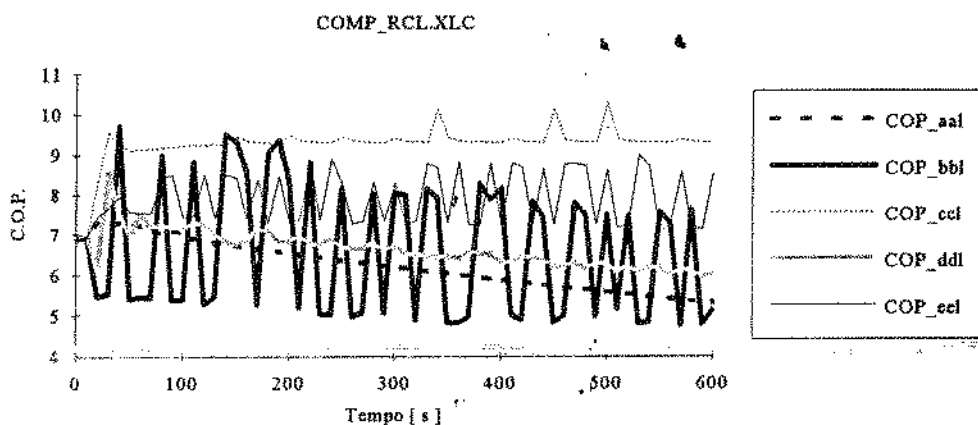


Figura 139 . Históricos dos valores da variável de processo (COP) sob perturbação em degrau de q_0 de - 3.500 kJ/h com set-point de $TG1 = 25,75 \text{ } ^\circ\text{C}$, controlado por diferentes bases de regras .

VI . 6 . 3 . COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DAS VARIÁVEIS SOB CONTROLE NEBULOSO COM DIFERENTES SET-POINT DE TG1.

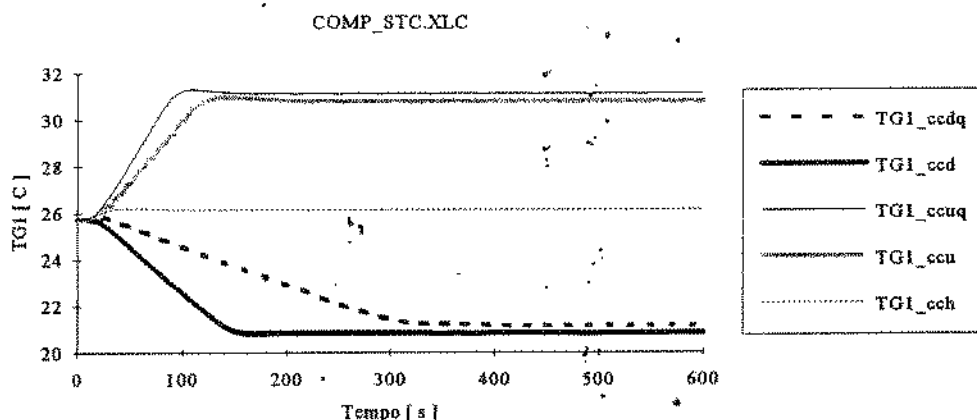


Figura 140 . Históricos dos valores da variável de processo (TG1) com diferentes set-point de TG1, controlado pela Base de Regras " C . REG " / Funções de Pertinência da Tabela 20.

NOTAÇÃO :

ccdq $\Rightarrow + q_0$ a $20,75 \text{ } ^\circ\text{C}$; ccd $\Rightarrow$ sem q_0 a $20,75 \text{ } ^\circ\text{C}$; ccuq $\Rightarrow + q_0$ a $30,75 \text{ } ^\circ\text{C}$;
ccu $\Rightarrow$ sem q_0 a $30,75 \text{ } ^\circ\text{C}$; cch $\Rightarrow + q_0$ a $25,75 \text{ } ^\circ\text{C}$

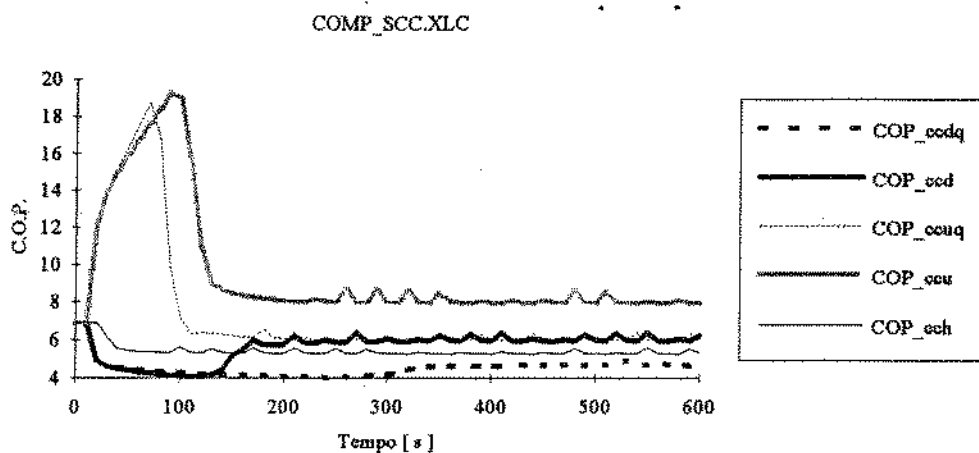


Figura 141 . Históricos dos valores da variável de processo (COP) com diferentes set-point de TG1, controlado pela Base de Regras “ C . REG ” / Funções de Pertinência da Tabela 20.

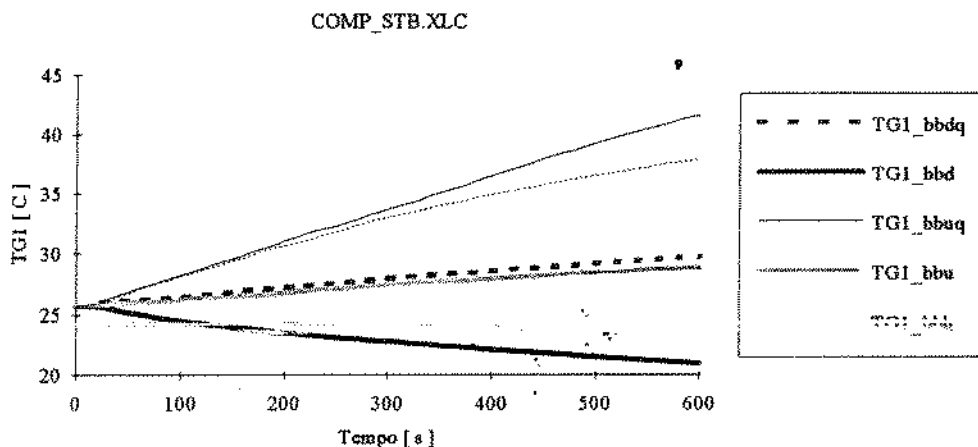


Figura 142 . Históricos dos valores da variável de processo (TG1) com diferentes set-point de COP, controlado pela Base de Regras “ B . REG ” / Funções de Pertinência da Tabela 20.

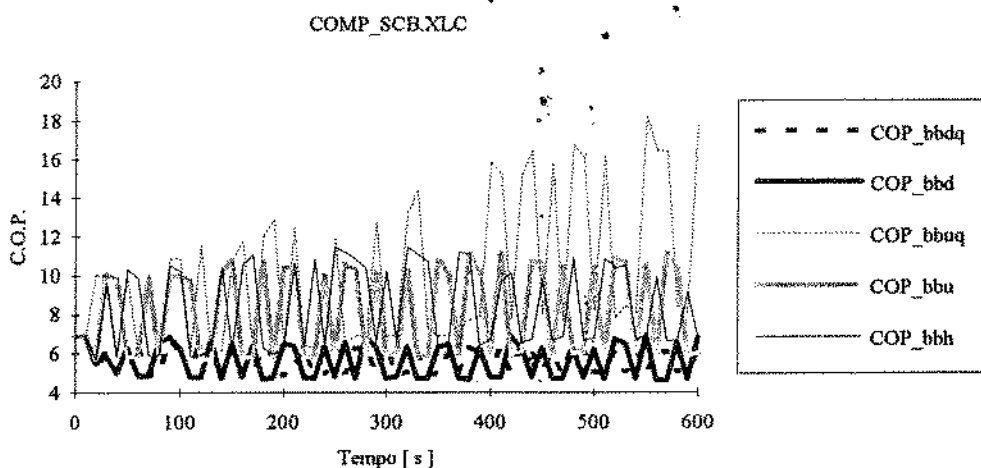


Figura 143 . Históricos dos valores da variável de processo (COP) com diferentes set-point de COP, controlado pela Base de Regras “ B . REG ” / Funções de Pertinência da Tabela 20.

NOTAÇÃO : amh $\Rightarrow$ Tabela 23 ; coh $\Rightarrow$ Tabela 24 ; dph $\Rightarrow$ Tabela 25

aah $\Rightarrow$ A.REG ; bbh $\Rightarrow$ B.REG ; cch $\Rightarrow$ C.REG ; ddh $\Rightarrow$ D.REG ; eeh $\Rightarrow$ E.REG ;

aal $\Rightarrow$ A.REG ; bbl $\Rightarrow$ B.REG ; ccl $\Rightarrow$ C.REG ; ddl $\Rightarrow$ D.REG ; eel $\Rightarrow$ E.REG ;

bbdq $\Rightarrow$ + q_o a 20,75 °C ; bbd $\Rightarrow$ sem q_o a 20,75 °C ; bbuq $\Rightarrow$ + q_o a 30,75 °C ;

bbu $\Rightarrow$ sem q_o a 30,75 °C ; bbh $\Rightarrow$ + q_o a 25,75 °C

VI. 7. RESULTADOS DAS VARIÁVEIS SOB CONTROLE “ON-OFF”

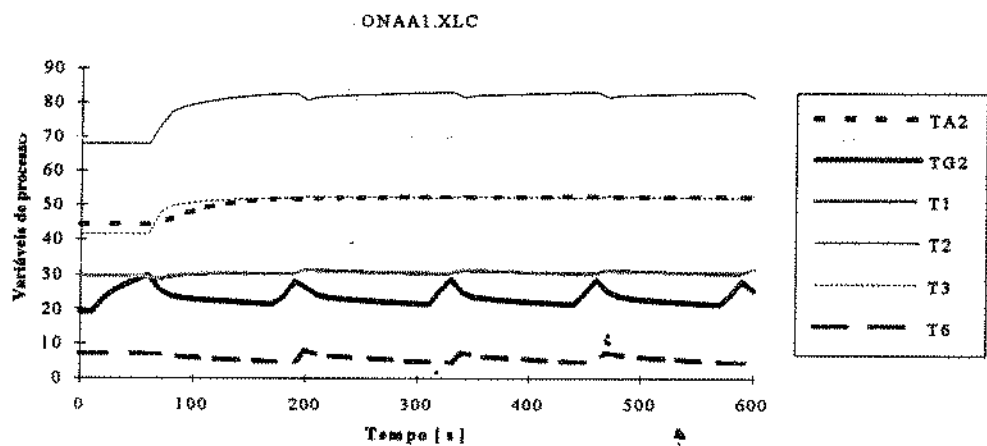


Figura 144 . Históricos dos valores das variáveis de processo controlado por lógica “on-off” sob perturbação em degrau de q_o de + 3.500 kJ/h com set-point de TG1 = 30,75 ° C e banda de $\Delta TG1=0,5$ ° C.

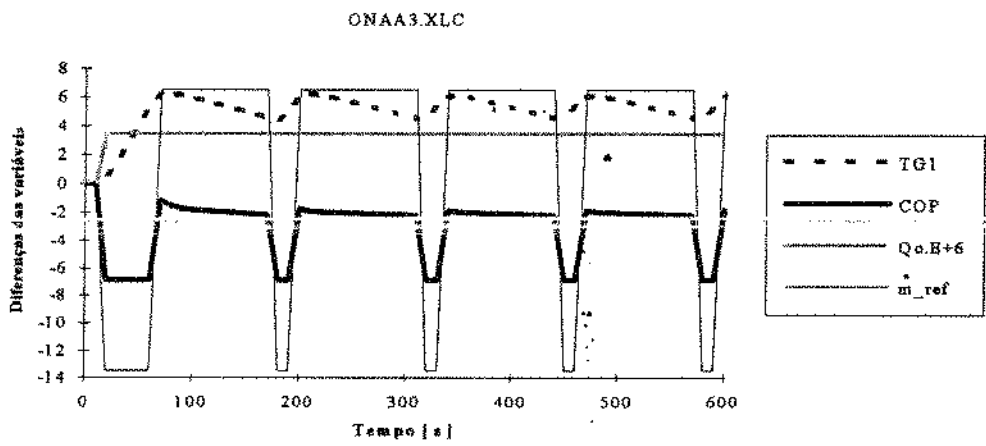


Figura 145 . Históricos das diferenças entre os valores das variáveis de processo e de controle e as condições iniciais controlado por lógica “ON-OFF” sob perturbação em degrau de q_o de + 3.500 kJ/h com set-point de TG1 = 30,75 ° C e banda de $\Delta TG1=0,5$ ° C.

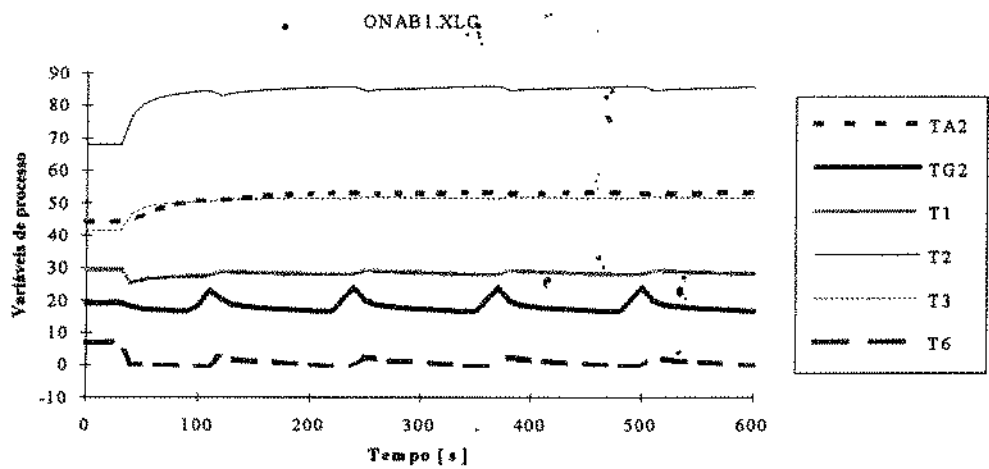


Figura 146 . Históricos dos valores das variáveis de processo controlado por lógica “on-off” sob perturbação em degrau de q_o de + 3.500 kJ/h com set-point de TG1 = 25,75 ° C e banda de $\Delta TG1=0,5$ ° C.

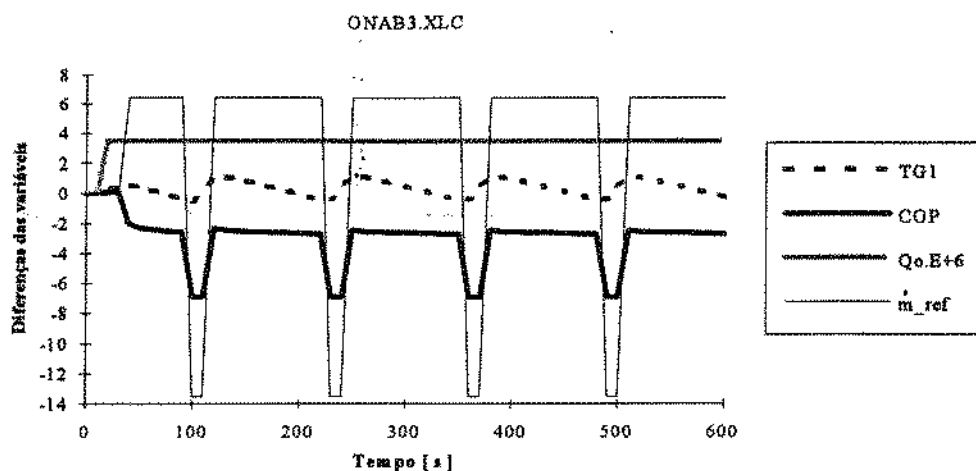


Figura 147 . Históricos das diferenças entre os valores das variáveis de processo e de controle e as condições iniciais controlado por lógica “ON-OFF” sob perturbação em degrau de q_o de + 3.500 kJ/h com set-point de $TG1 = 25,75^\circ\text{C}$ e banda de $\Delta TG1 = 0,5^\circ\text{C}$.

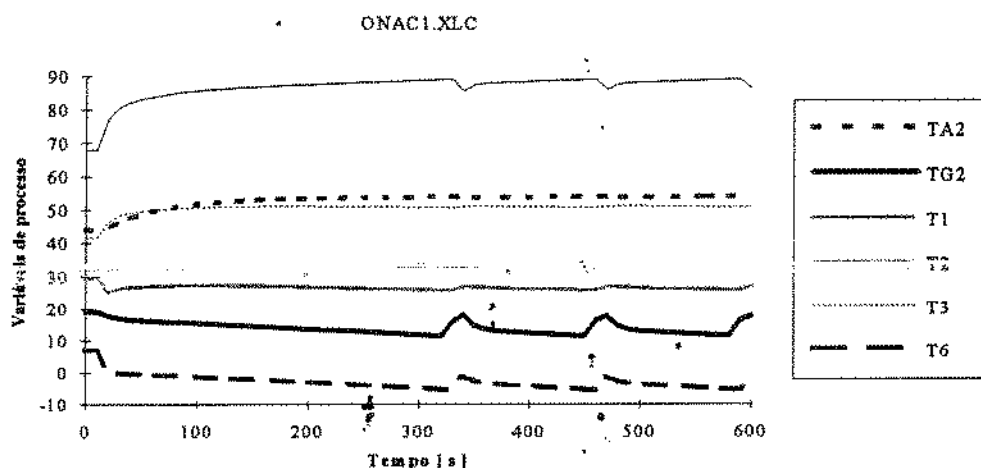


Figura 148 . Históricos dos valores das variáveis de processo controlado por lógica “on-off” sob perturbação em degrau de q_o de + 3.500 kJ/h com set-point de $TG1 = 20,75^\circ\text{C}$ e banda de $\Delta TG1 = 0,5^\circ\text{C}$.

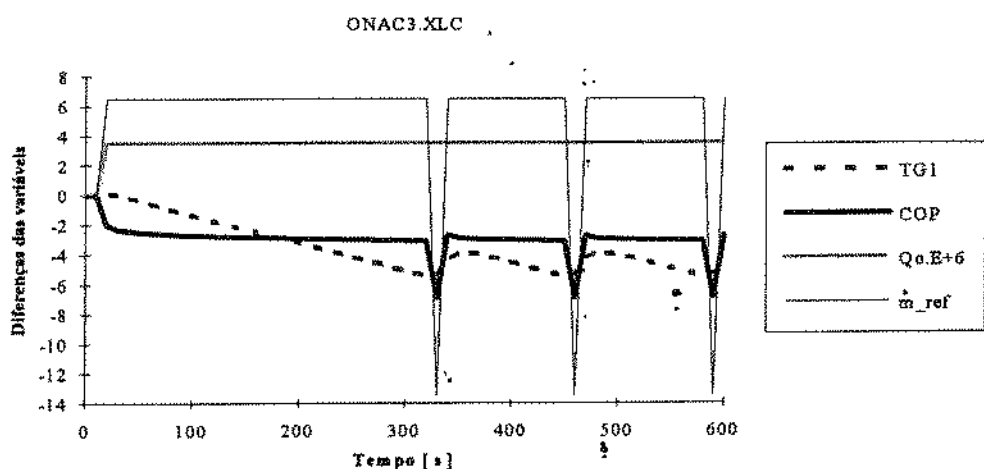


Figura 149 . Históricos das diferenças entre os valores das variáveis de processo e de controle e as condições iniciais controlado por lógica “on-off” sob perturbação em degrau de q_o de + 3.500 kJ/h com set-point de $TG1 = 20,75^\circ\text{C}$ e banda de $\Delta TG1 = 0,5^\circ\text{C}$.

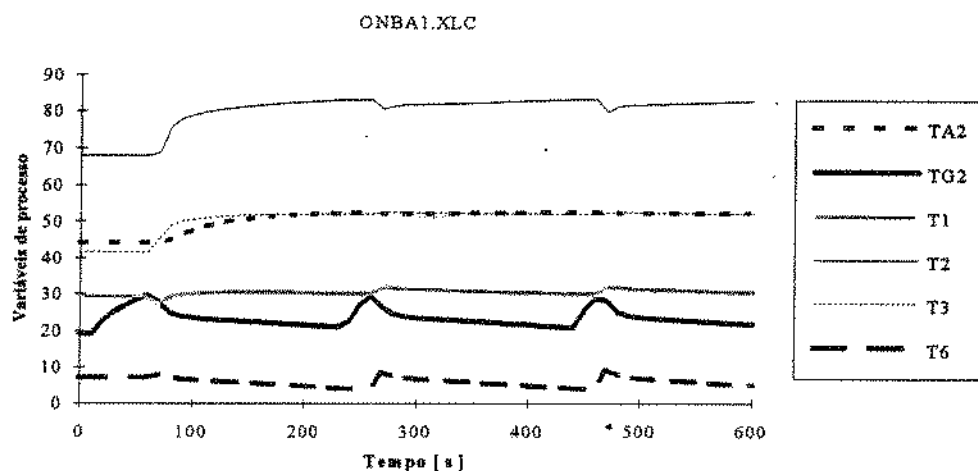


Figura 150 . Históricos dos valores das variáveis de processo controlado por lógica “on-off” sob perturbação em degrau de q_o de + 3.500 kJ/h com set-point de TG1 = 30,75 ° C e banda de $\Delta TG1= 1,0$ ° C.

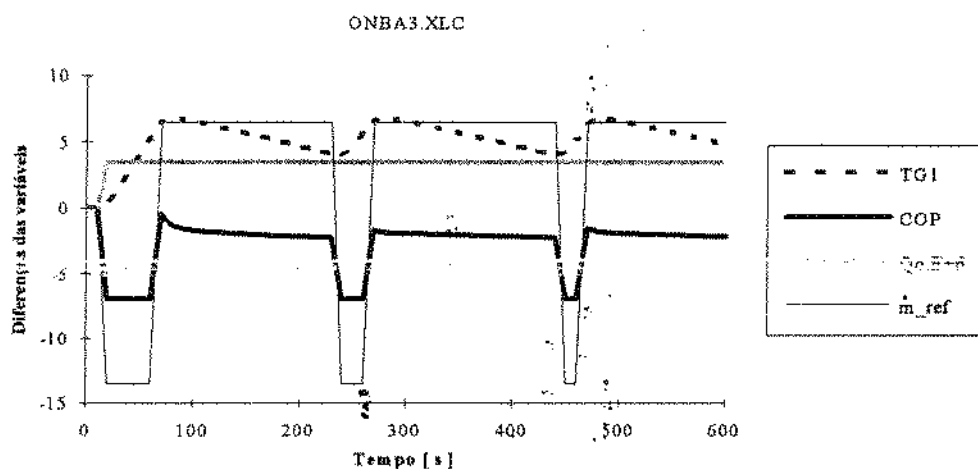


Figura 151 . Históricos das diferenças entre os valores das variáveis de processo e de controle e as condições iniciais controlado por lógica “on-off” sob perturbação em degrau de q_o de + 3.500 kJ/h com set-point de TG1 = 30,75 ° C e banda de $\Delta TG1= 1,0$ ° C.

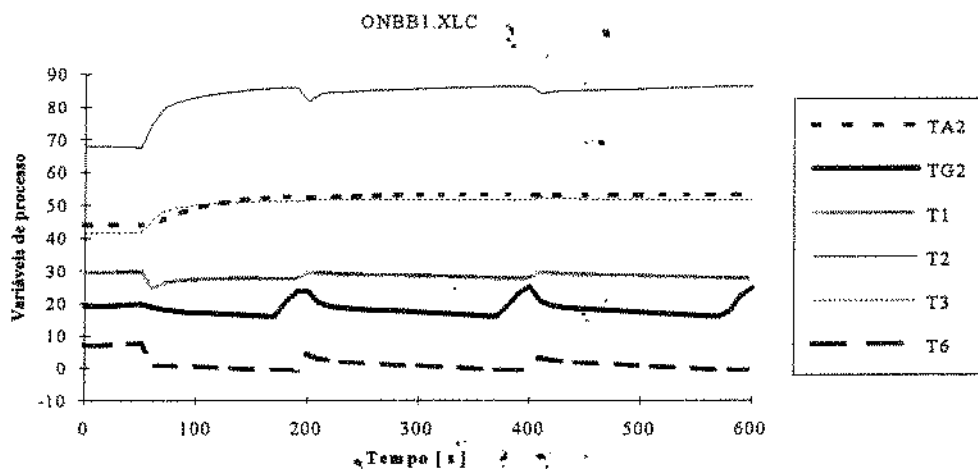


Figura 152 . Históricos dos valores das variáveis de processo controlado por lógica “on-off” sob perturbação em degrau de q_o de + 3.500 kJ/h com set-point de TG1 = 25,75 ° C e banda de $\Delta TG1= 1,0$ ° C.

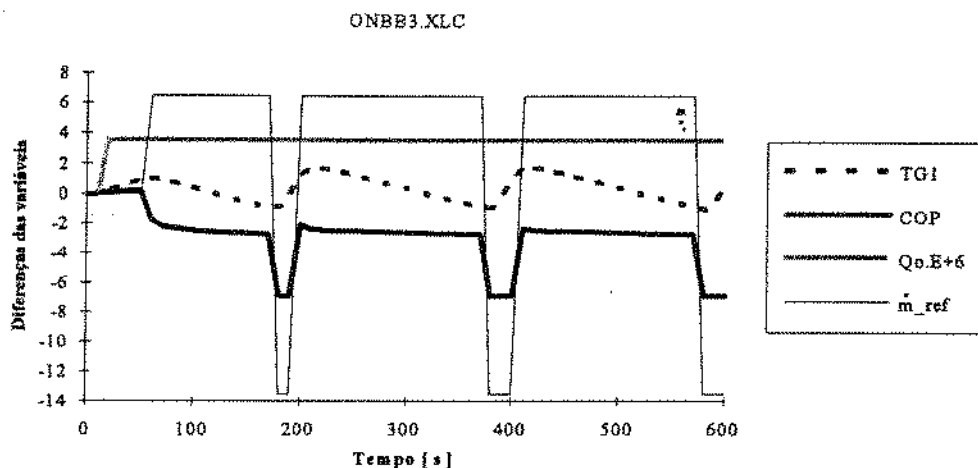


Figura 153 . Históricos das diferenças entre os valores das variáveis de processo e de controle e as condições iniciais controlado por lógica “on-off” sob perturbação em degrau de q_o de + 3.500 kJ/h com set-point de $TG1 = 25,75^\circ\text{C}$ e banda de $\Delta TG1 = 1,0^\circ\text{C}$.

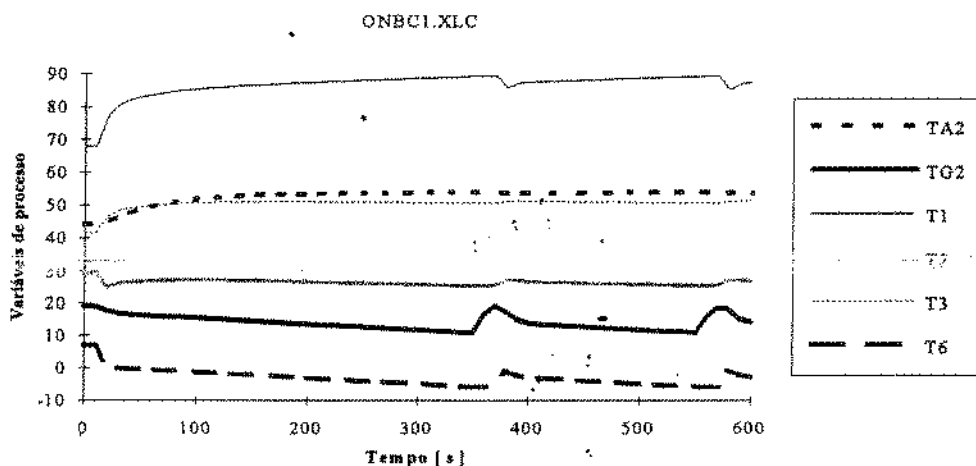


Figura 154 . Históricos dos valores das variáveis de processo controlado por lógica “on-off” sob perturbação em degrau de q_o de + 3.500 kJ/h com set-point de $TG1 = 20,75^\circ\text{C}$ e banda de $\Delta TG1 = 1,0^\circ\text{C}$.

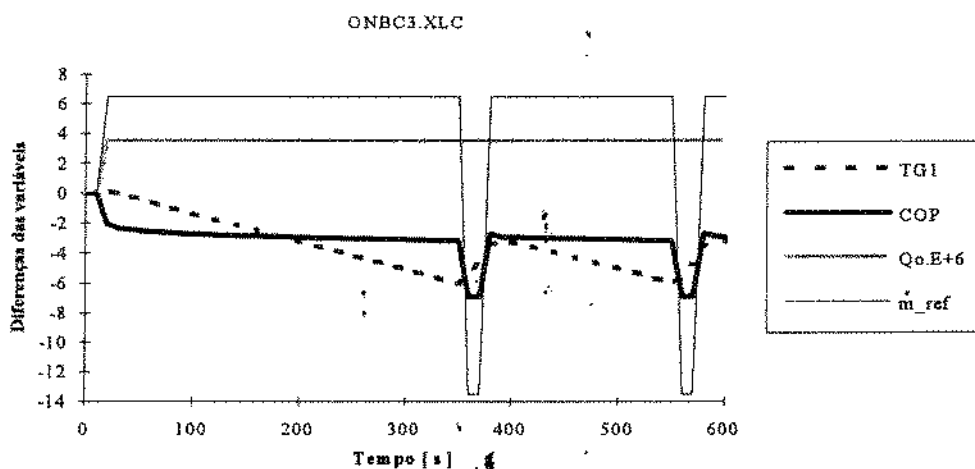


Figura 155 . Históricos das diferenças entre os valores das variáveis de processo e de controle e as condições iniciais controlado por lógica “on-off” sob perturbação em degrau de q_o de + 3.500 kJ/h com set-point de $TG1 = 20,75^\circ\text{C}$ e banda de $\Delta TG1 = 1,0^\circ\text{C}$.

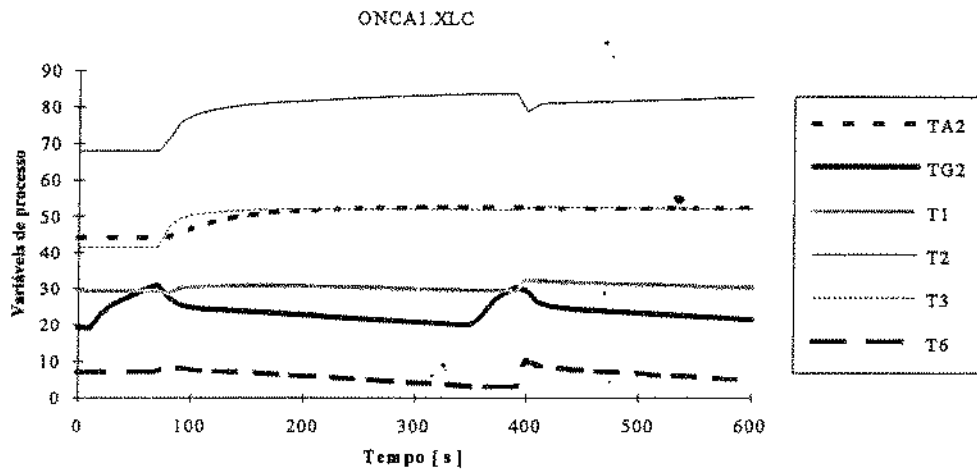


Figura 156 . Históricos dos valores das variáveis de processo controlado por lógica “on-off” sob perturbação em degrau de q_o de + 3.500 kJ/h com set-point de TG1 = 30,75 ° C e banda de $\Delta TG1= 2,0$ ° C.

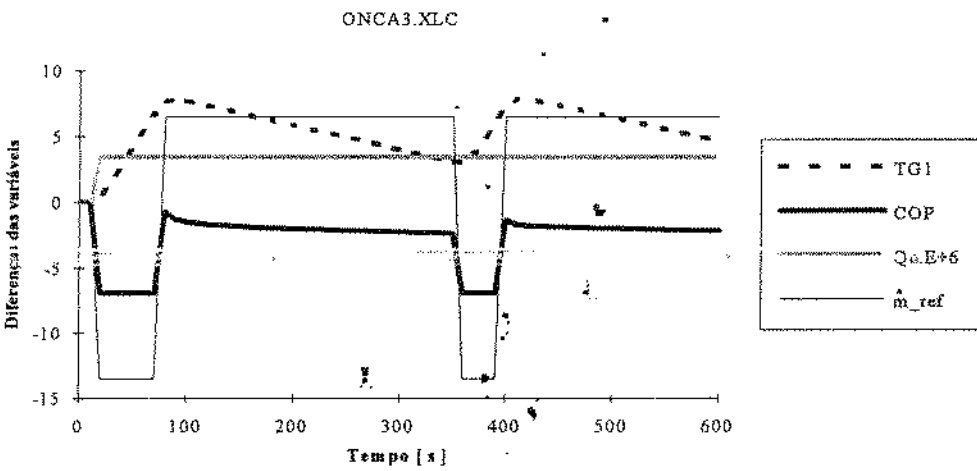


Figura 157 . Históricos das diferenças entre os valores das variáveis de processo e de controle e as condições iniciais controlado por lógica “on-off” sob perturbação em degrau de q_o de + 3.500 kJ/h com set-point de TG1 = 30,75 ° C e banda de $\Delta TG1= 2,0$ ° C.

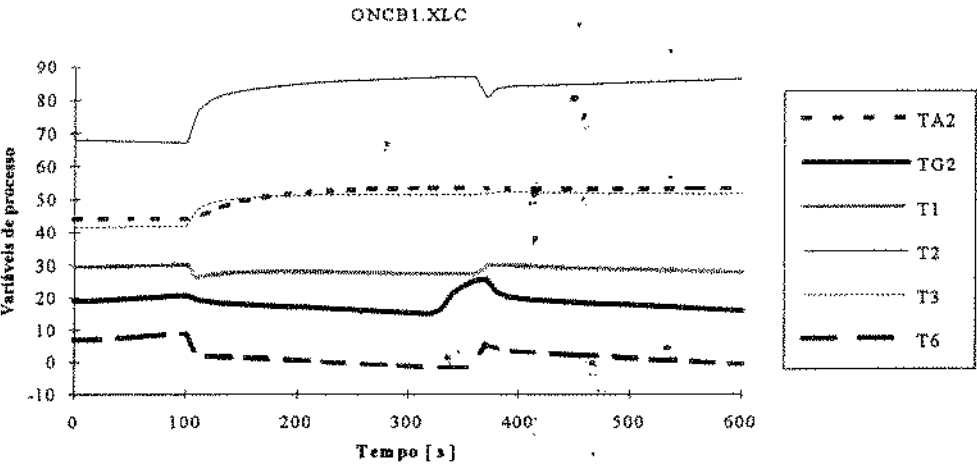


Figura 158 . Históricos dos valores das variáveis de processo controlado por lógica “on-off” sob perturbação em degrau de q_o de + 3.500 kJ/h com set-point de TG1 = 25,75 ° C e banda de $\Delta TG1= 2,0$ ° C.

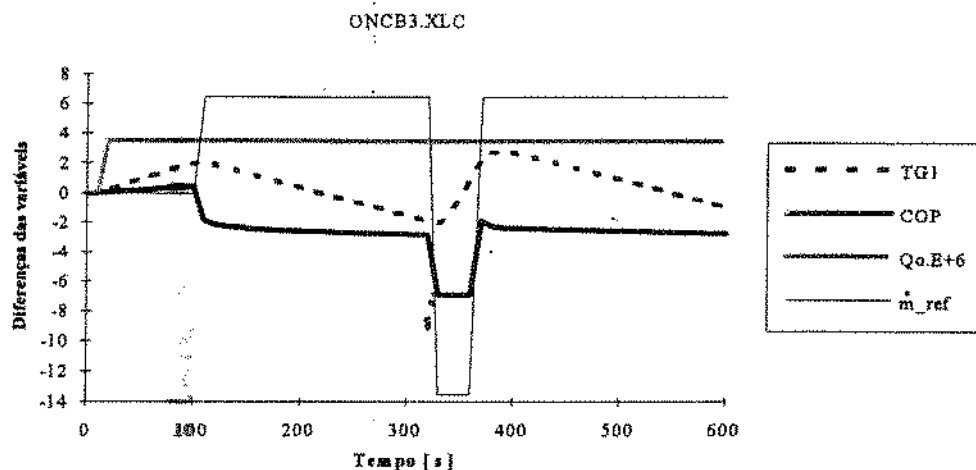


Figura 159 . Históricos das diferenças entre os valores das variáveis de processo e de controle e as condições iniciais controlado por lógica “on-off” sob perturbação em degrau de q_o de + 3.500 kJ/h com set-point de TG1 = 25,75 ° C e banda de $\Delta TG1=2,0$ ° C.

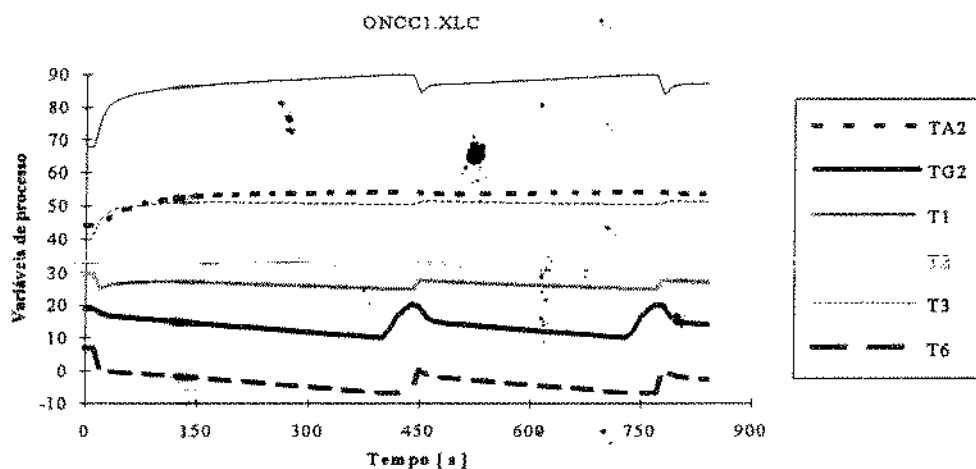


Figura 160 . Históricos dos valores das variáveis de processo controlado por lógica “on-off” sob perturbação em degrau de q_o de + 3.500 kJ/h com set-point de TG1 = 20,75 ° C e banda de $\Delta TG1=2,0$ ° C.

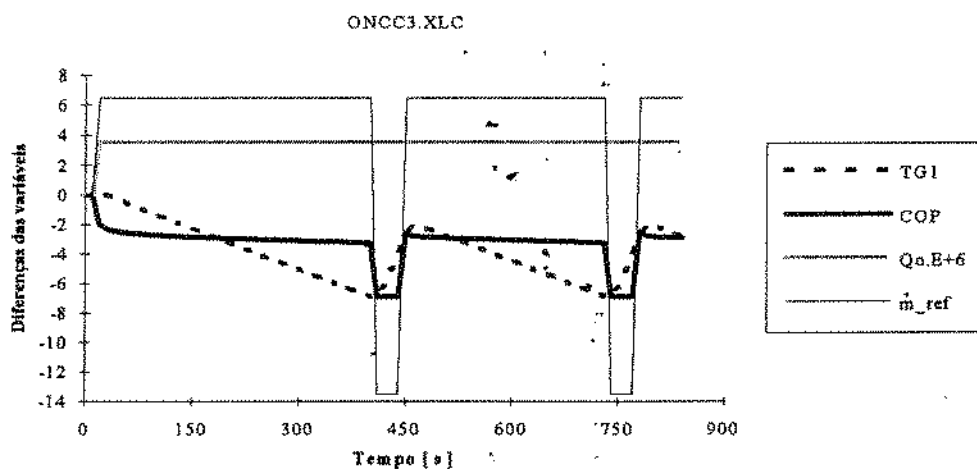


Figura 161 . Históricos das diferenças entre os valores das variáveis de processo e de controle e as condições iniciais controlado por lógica “on-off” sob perturbação em degrau de q_o de + 3.500 kJ/h com set-point de TG1 = 20,75 ° C e banda de $\Delta TG1=2,0$ ° C.

VI. 8 . COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DAS VARIÁVEIS SOB CONTROLE “ON-OFF” COM DIFERENTES SET-POINT DE TG1.

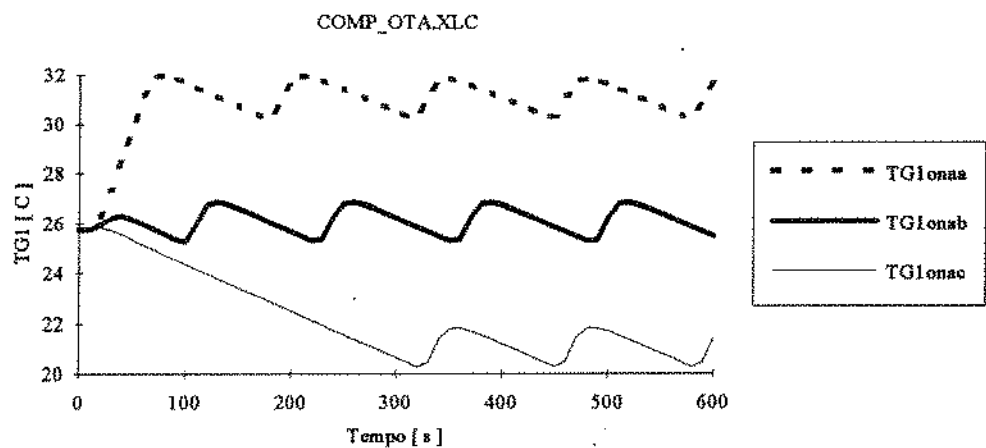


Figura 162 . Históricos dos valores da variável de processo (TG1) sob perturbação de 3.500 kJ/h com diferentes set-point de TG1 e banda de controle de 0,5 ° C.

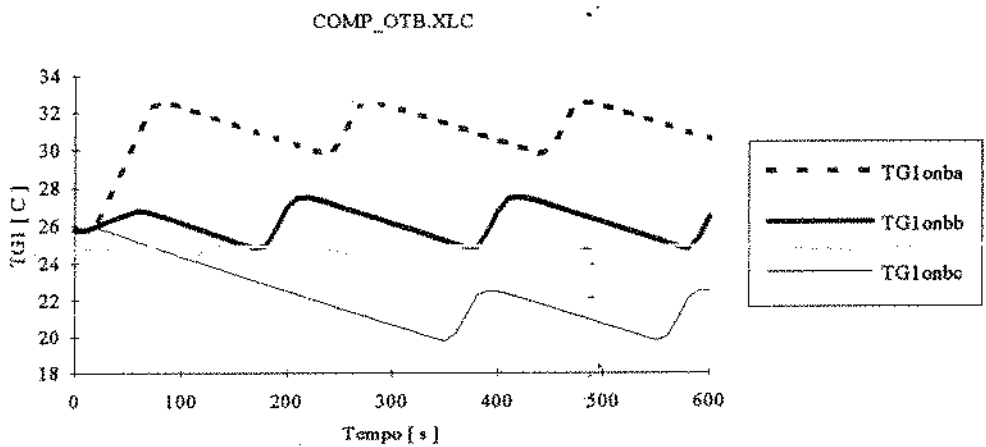


Figura 163 . Históricos dos valores da variável de processo (TG1) sob perturbação de 3.500 kJ/h com diferentes set-point de TG1 e banda de controle de 1,0 ° C.

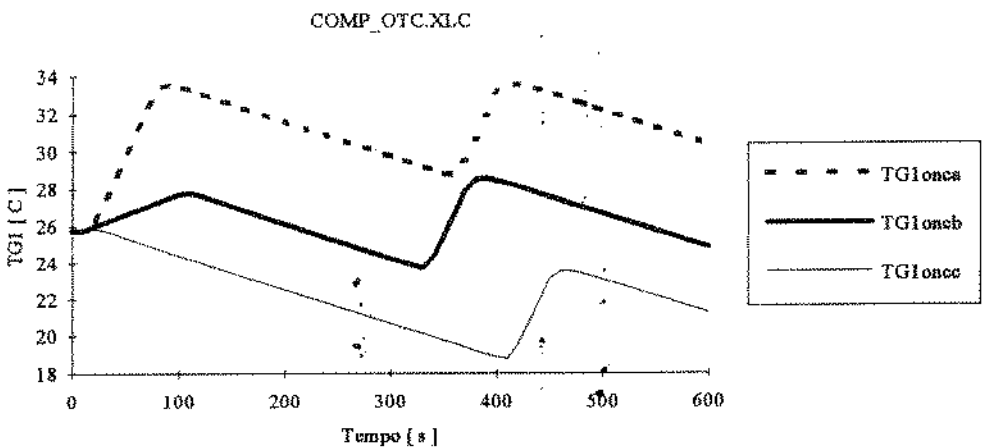


Figura 164 . Históricos dos valores da variável de processo (TG1) sob perturbação de 3.500 kJ/h com diferentes set-point de TG1 e banda de controle de 2,0 ° C.

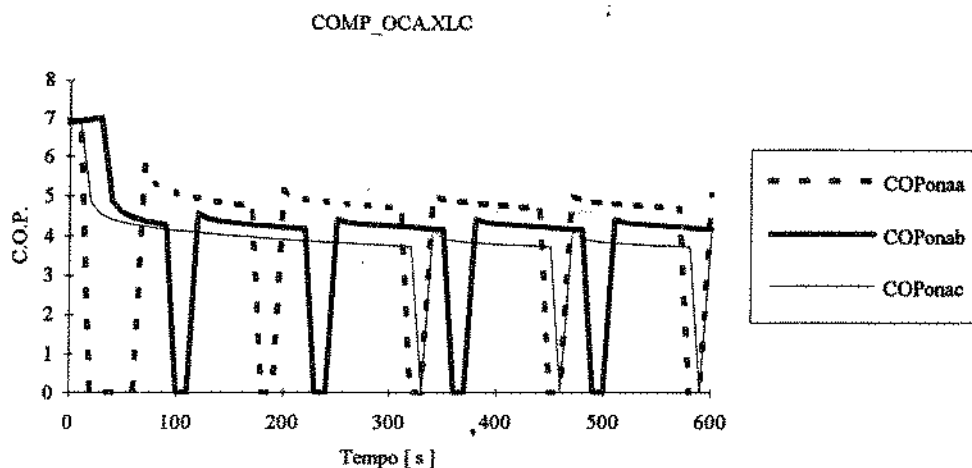


Figura 165 . Históricos dos valores da variável de processo (COP) sob perturbação de 3.500 kJ/h com diferentes set-point de TG1 e banda de controle de 0,5 ° C.

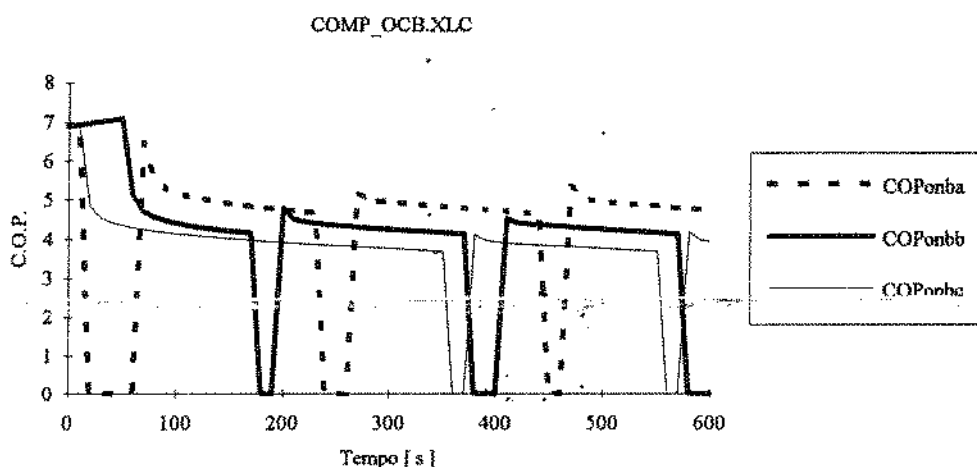


Figura 166 . Históricos dos valores da variável de processo (COP) sob perturbação de 3.500 kJ/h com diferentes set-point de TG1 e banda de controle de 1,0 ° C.

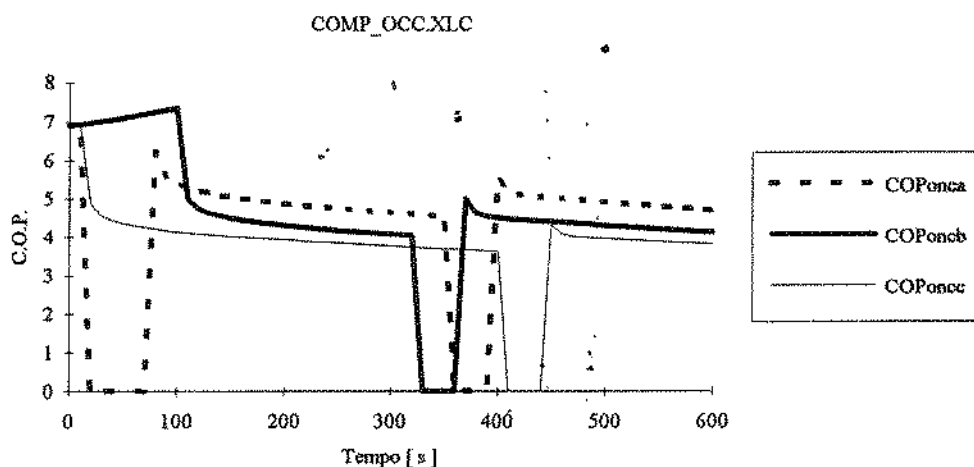


Figura 167 . Históricos dos valores da variável de processo (COP) sob perturbação de 3.500 kJ/h com diferentes set-point de TG1 e banda de controle de 2,0 ° C.

VI. 9. COMPARAÇÃO DAS LÓGICAS DE CONTROLES NEBULOSO E “ON-OFF”.

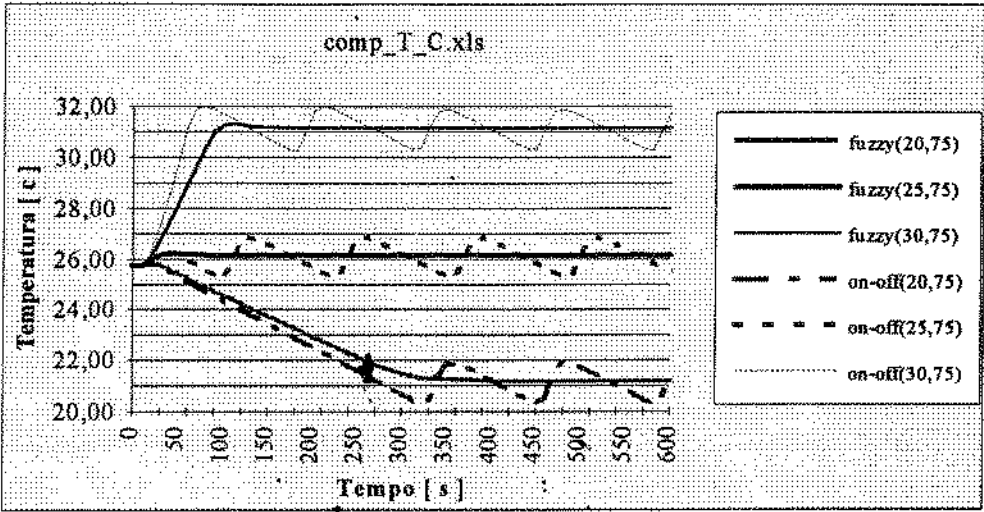


Figura 168 . Comparação dos valores de TG1 do processo sob controles nebuloso (C . REG / Tabela 25) e “on-off” ($\Delta TG1 = 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$) com perturbação em degrau de + 3.500 kJ/h a diferentes set_point_TG1.

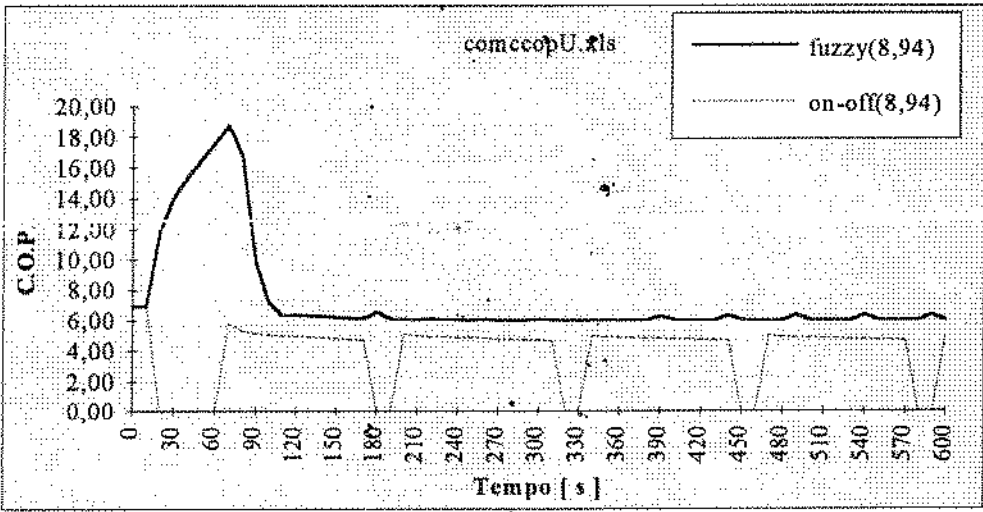


Figura 169 . Comparação dos valores de COP do processo sob controles nebuloso (C . REG / Tabela 25) e “on-off” ($\Delta TG1 = 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$) com perturbação em degrau de + 3.500 kJ/h a set_point_TG1= 30,75 °C.

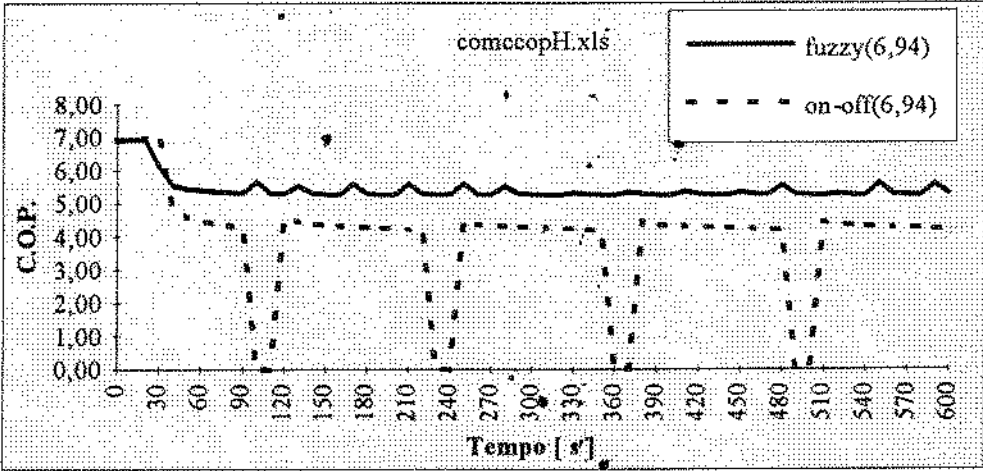


Figura 170 . Comparação dos valores de COP do processo sob controles nebuloso (C . REG/Tabela 25) e “on-off” ($\Delta TG1 = 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$) com perturbação em degrau de + 3.500 kJ/h a set_point_TG1= 25,75 °C.

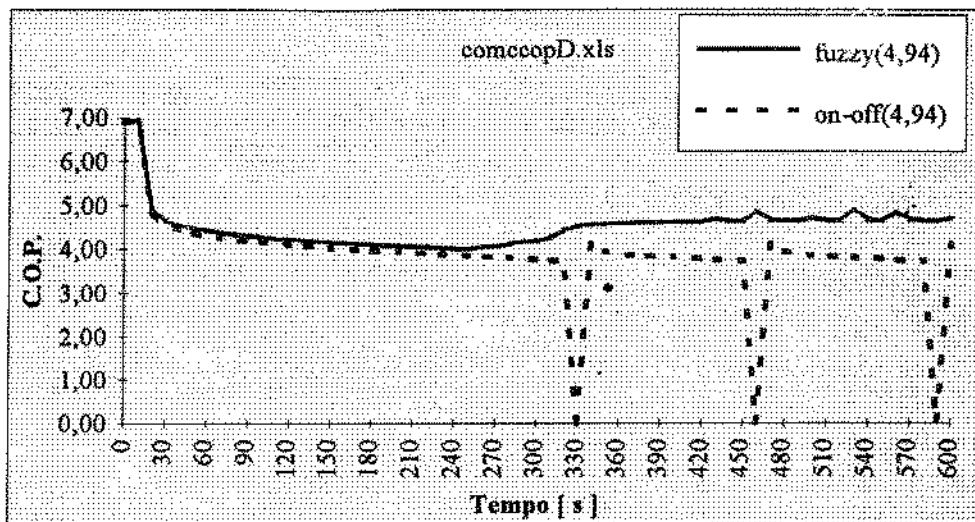


Figura 171 . Comparação dos valores de COP do processo sob controles nebuloso (C . REG / Tabela 25) e “on-off” ($\Delta TG1 = 0,5^{\circ}C$) com perturbação em degrau de + 3.500 kJ/h a set_point_TG1= 20,75 $^{\circ}C$.

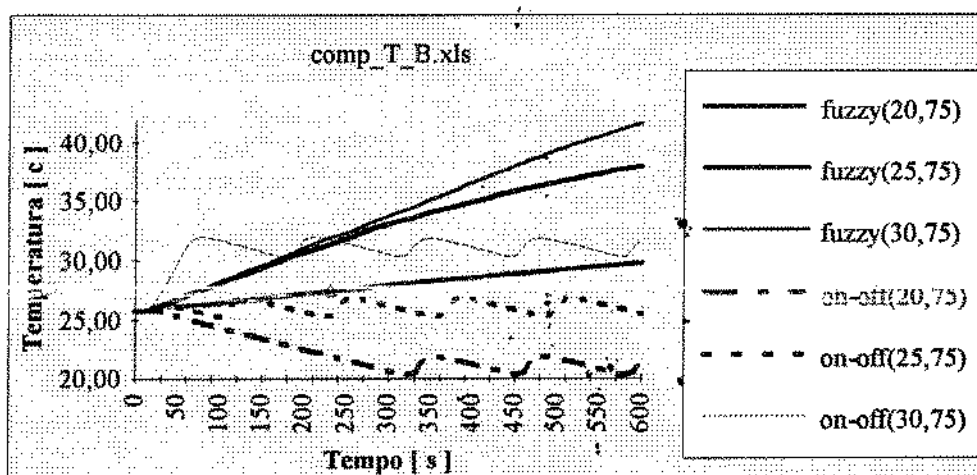


Figura 172 . Comparação dos valores de TG1 do processo com perturbação em degrau de + 3.500 kJ/h sob controles nebuloso (B . REG / Tabela 25) a diferentes set_point_COP e “on-off” ($\Delta TG1 = 0,5^{\circ}C$) a diferentes set_point_TG1.

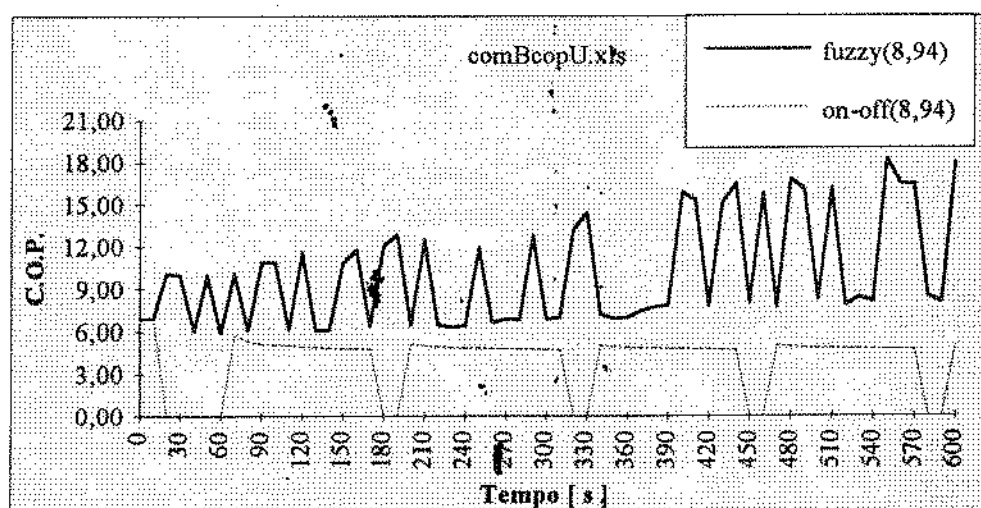


Figura 173 . Comparação dos valores de COP do processo com perturbação em degrau de + 3.500 kJ/h sob controles nebuloso (B . REG / Tabela 25) a set_point_COP = 8,94 e “on-off” ($\Delta TG1 = 0,5^{\circ}C$) a set_point_TG1 = 30,75 $^{\circ}C$.

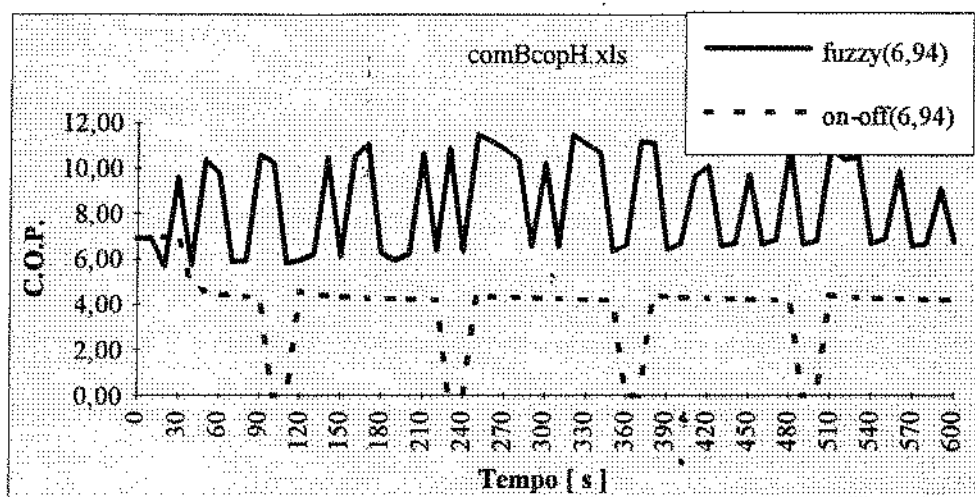


Figura 174 . Comparação dos valores de COP do processo com perturbação em degrau de + 3.500 kJ/h sob controles nebuloso (B . REG / Tabela 25) a set_point_COP = 6,94 e “on-off” ($\Delta TG1 = 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$) a set_point_TG1 = 25,75 $^{\circ}\text{C}$.

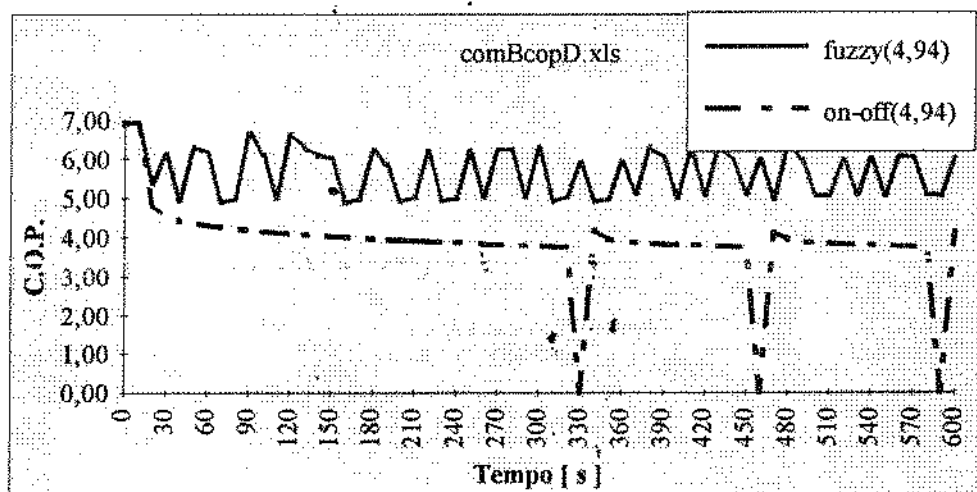


Figura 175 . Comparação dos valores de COP do processo com perturbação em degrau de + 3.500 kJ/h sob controles nebuloso (B . REG / Tabela 25) a set_point_COP = 8,94 e “on-off” ($\Delta TG1 = 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$) a set_point_TG1 = 20,75 $^{\circ}\text{C}$.

VI. 10 . PROGRAMA DE CONTROLE COM A BASE DE DADOS

VI. 10 . 1 . PROGAMA DE REGRAS “ A . REG ”

```
#####  
#  
# LABORATÓRIO DE INSTRUMENTAÇÃO E CONTROLE / FEA #  
#  
# Projeto : CHILLER INTELIGENTE #  
# Arquivo : A . REG #  
#  
#####
```

```
#####  
#  
# DECLARACAO DE VARIAVEIS #  
#  
#####
```

VAR

```
#####  
# Variaveis analogicas #  
#####
```

ANALOGICA

```
err_qo,      # Erro na carga térmica  
err_ta1,     # Erro na Temperatura da água de entrada no condensador  
err_ta2,     # Erro na Temperatura da água de saída do condensador  
err_tgl,     # Erro na Temperatura do Eglic. de entrada do evaporador  
err_t3,      # Erro na Temperatura do refriger. de saída do condensador  
err_t6,      # Erro na Temperatura do refriger. de saída do evaporador  
err_t1,      # Erro na Temperatura do refriger. de saída do sub-resfriador  
err_cop,     # Erro no Coeficiente de performance  
err_mref,    # Vazão mássica de refrigerante  
err_mag,     # Vazão mássica de água  
err_meglic;  # Vazão mássica de etileno glicol
```

```
#####  
# Variaveis Nebulosas #  
#####
```

```
#
# PARA A NEBULIZAÇÃO :
#
```

```
FUZZY Fz_err_qo [-7500, 7500] = # universo = -7.500 a +7.500 kJ/h
{
    muito_neg_err_qo,      # Particao - Erro na carga térmica muito negativa
    neg_err_qo,            # Particao - Erro na carga térmica negativo
    zero_err_qo,           # Particao - Erro na carga térmica nulo
    pos_err_qo,            # Particao - Erro na carga térmica alta
    muito_pos_err_qo       # Particao - Erro na carga térmica altíssima
},
err_qo,                   # Variavel de amostragem de processo
#
```

```
Fz_err_tal [-1500, 1500] =      # universo = -15 a +15 C
{
    muito_neg_err_tal,      # Particao - Erro na Temper. muito negativo da água de entrada no cond.
    neg_err_tal,           # Particao - Erro na Temper. negativo da água de entrada no condensador
    zero_err_tal,          # Particao - Erro na Temper. média da água de entrada no condensador
    pos_err_tal,           # Particao - Erro na Temper. alta da água de entrada no condensador
    muito_pos_err_tal      # Particao - Erro na Temper. muito alta da água de entrada no
condensador
},
err_tal,                   # Variavel de amostragem de processo
#
```

```
Fz_err_ta2 [-1500, 1500] =      # universo = -15 a +15 C
{
    muito_neg_err_ta2,      # Particao - Erro na Temper. muito negativa da água na saída do cond.
    neg_err_ta2,           # Particao - Erro na Temper. negativo da água na saída do cond.
    zero_err_ta2,          # Particao - Erro na Temper. nulo da água na saída do cond.
    pos_err_ta2,           # Particao - Erro na Temper. alta da água na saída do cond.
    muito_pos_err_ta2       # Particao - Erro na Temper. altíssima da água na saída do cond.
},
err_ta2,                   # Variavel de amostragem de processo
#
```

```
Fz_err_tgl [-1500, 1500] =      # universo = -15 a +15 C
{
    muito_neg_err_tgl,      # Particao - Erro na Temper. do Eglic. de entrada do evap. muito negativa
    neg_err_tgl,           # Particao - Erro na Temper. do Eglic. muito negativo de entrada do evap.
    zero_err_tgl,          # Particao - Erro na Temper. do Eglic. nulo de entrada do evap.
    pos_err_tgl,           # Particao - Erro na Temper. do Eglic. alta de entrada do evap.
    muito_pos_err_tgl       # Particao - Erro na Temper. do Eglic. altíssima de entrada do evap.
},
err_tgl,                   # Variavel de amostragem de processo
#
```

```

Fz_err_t3 [-1500, 1500] =      # universo = -15 a +15 C
{
    muito_neg_err_t3,      # Particao - Erro na Temper. do refrig. muito negativa na saída do cond.
    neg_err_t3,            # Particao - Erro na Temper. do refrig. negativo na saída do cond.
    zero_err_t3,           # Particao - Erro na Temper. do refrig. nulo na saída do cond.
    pos_err_t3,            # Particao - Erro na Temper. do refrig. alta na saída do cond.
    muito_pos_err_t3       # Particao - Erro na Temper. do refrig. altíssima na saída do cond.
},
err_t3,                    # Variavel de amostragem de processo
#

Fz_err_t6 [-1500, 1500] =      # universo = -15 a +15 C
{
    muito_neg_err_t6,      # Particao - Erro na Temper. do refrig. muito negativa na saída do evap.
    neg_err_t6,            # Particao - Erro na Temper. do refrig. negativo na saída do evap.
    zero_err_t6,           # Particao - Erro na Temper. do refrig. nulo na saída do evap.
    pos_err_t6,            # Particao - Erro na Temper. do refrig. alta na saída do evap.
    muito_pos_err_t6       # Particao - Erro na Temper. do refrig. altíssima na saída do evap.
},
err_t6,                    # Variavel de amostragem de processo
#

Fz_err_t1 [-1500, 1500] =      # universo = -15 a +15 C
{
    muito_neg_err_t1,      # Particao - Erro na Temper. do refrig. muito negativa de saída do sub-
resfr.
    neg_err_t1,            # Particao - Erro na Temper. do refrig. negativo de saída do sub-resfr.
    zero_err_t1,           # Particao - Erro na Temper. do refrig. nulo de saída do sub-resfr.
    pos_err_t1,            # Particao - Erro na Temper. do refrig. alta de saída do sub-resfr.
    muito_pos_err_t1       # Particao - Erro na Temper. do refrig. altíssima de saída do sub-resfr.
},
err_t1,                    # Variavel de amostragem de processo
#

Fz_err_cop [ -700, 700 ] =      # universo = -7.0 a +7.0 [ % ]
{
    muito_neg_err_cop,      # Particao - Erro do Coeficiente de performance muito negativo
    neg_err_cop,            # Particao - Erro do Coeficiente de performance neg
    zero_err_cop,           # Particao - Erro do Coeficiente de performance nulo
    pos_err_cop,            # Particao - Erro do Coeficiente de performance alto
    muito_pos_err_cop       # Particao - Erro do Coeficiente de performance altíssimo
},
err_cop,                    # Variavel de amostragem de processo

```

```

#
# PARA A DESNEBULIZAÇÃO:
#

Fz_mref [ 70, 200] =          # universo = 70 a 200 kg/h
{
    muito_baixo_mref,         # Particao - Vazão mássica de refrig. muito negativa
    baixo_mref,                # Particao - Vazão mássica de refrig. negativo
    medio_mref,                # Particao - Vazão mássica de refrig. media
    alto_mref,                 # Particao - Vazão mássica de refrig. alta
    muito_alto_mref            # Particao - Vazão mássica de refrig. altíssima
},
err_mref,                     # Variavel de Atuacao

#

Fz_mag [ 50, 450] =           # universo = 50 a 450 kg/h
{
    muito_baixo_mag,          # Particao - Vazão mássica de água muito negativa
    baixo_mag,                 # Particao - Vazão mássica de água negativo
    medio_mag,                 # Particao - Vazão mássica de água media
    alto_mag,                  # Particao - Vazão mássica de água alta
    muito_alto_mag             # Particao - Vazão mássica de água altíssima
},
err_mag,                      # Variavel de Atuacao

#

Fz_meglic [ 500, 1000] =      # universo = 500 a 1000 kg/h
{
    muito_baixo_meglic,       # Particao - Vazão mássica de eglicol muito negativa
    baixo_meglic,              # Particao - Vazão mássica de eglicol negativo
    medio_meglic,              # Particao - Vazão mássica de eglicol media
    alto_meglic,               # Particao - Vazão mássica de eglicol alta
    muito_alto_meglic          # Particao - Vazão mássica de eglicol altíssima
},
err_meglic;                   # Variavel de Atuacao

```

```

#####
#
#   DECLARACAO DOS GRUPOS DE PROGRAMA NEBULOSO
#
#####

```

GRUPOS

```

PRINCIPAL;    # apenas um grupo de programa

```

```
#####
#
#                               #
#                               #
#                               #
#####
```

REGRAS

Programa de regras do grupo PRINCIPAL

GRUPO PRINCIPAL

```
{
PREPROCESSAMENTO          # Obtem os sinais do processo
{
```

Fuzzifica as variáveis de processo

```
Fuzzyfica(Fz_err_qo);
Fuzzyfica(Fz_err_ta1);
Fuzzyfica(Fz_err_ta2);
Fuzzyfica(Fz_err_tg1);
Fuzzyfica(Fz_err_t3);
Fuzzyfica(Fz_err_t6);
Fuzzyfica(Fz_err_t1);
Fuzzyfica(Fz_err_cop);
```

```
}
```

Programa de Regras

```
#
# Regras referenciadas a carga térmica :
#
```

```
SE Fz_err_qo == muito_neg_err_qo  ENTAO  Fz_mref = muito_baixo_mref;
SE Fz_err_qo == neg_err_qo        ENTAO  Fz_mref = baixo_mref;
SE Fz_err_qo == zero_err_qo       ENTAO  Fz_mref = medio_mref;
SE Fz_err_qo == pos_err_qo        ENTAO  Fz_mref = alto_mref;
SE Fz_err_qo == muito_pos_err_qo  ENTAO  Fz_mref = muito_alto_mref;
```

```
SE Fz_err_qo == muito_neg_err_qo  ENTAO  Fz_meglic = muito_alto_meglic;
SE Fz_err_qo == neg_err_qo        ENTAO  Fz_meglic = alto_meglic;
SE Fz_err_qo == zero_err_qo       ENTAO  Fz_meglic = medio_meglic;
SE Fz_err_qo == pos_err_qo        ENTAO  Fz_meglic = baixo_meglic;
SE Fz_err_qo == muito_pos_err_qo  ENTAO  Fz_meglic = muito_baixo_meglic;
```

```

SE Fz_err_qo == muito_neg_err_qo  ENTAO  Fz_mag = muito_baixo_mag;
SE Fz_err_qo == neg_err_qo         ENTAO  Fz_mag = baixo_mag;
SE Fz_err_qo == zero_err_qo        ENTAO  Fz_mag = medio_mag;
SE Fz_err_qo == pos_err_qo         ENTAO  Fz_mag = alto_mag;
SE Fz_err_qo == muito_pos_err_qo   ENTAO  Fz_mag = muito_alto_mag;

```

#

Regras referenciadas a Erro na Temperatura da água de entrada no condensador :

#

```

SE Fz_err_tal == muito_neg_err_tal  ENTAO  Fz_mref = muito_alto_mref;
SE Fz_err_tal == neg_err_tal        ENTAO  Fz_mref = alto_mref;
SE Fz_err_tal == zero_err_tal       ENTAO  Fz_mref = medio_mref;
SE Fz_err_tal == pos_err_tal        ENTAO  Fz_mref = baixo_mref;
SE Fz_err_tal == muito_pos_err_tal  ENTAO  Fz_mref = muito_baixo_mref;

```

```

SE Fz_err_tal == muito_neg_err_tal  ENTAO  Fz_meglic = muito_alto_meglic;
SE Fz_err_tal == neg_err_tal        ENTAO  Fz_meglic = alto_meglic;
SE Fz_err_tal == zero_err_tal       ENTAO  Fz_meglic = medio_meglic;
SE Fz_err_tal == pos_err_tal        ENTAO  Fz_meglic = baixo_meglic;
SE Fz_err_tal == muito_pos_err_tal  ENTAO  Fz_meglic = muito_baixo_meglic;

```

```

SE Fz_err_tal == muito_neg_err_tal  ENTAO  Fz_mag = muito_baixo_mag;
SE Fz_err_tal == neg_err_tal        ENTAO  Fz_mag = baixo_mag;
SE Fz_err_tal == zero_err_tal       ENTAO  Fz_mag = medio_mag;
SE Fz_err_tal == pos_err_tal        ENTAO  Fz_mag = alto_mag;
SE Fz_err_tal == muito_pos_err_tal  ENTAO  Fz_mag = muito_alto_mag;

```

#

Regras referenciadas a Erro na Temperatura da água de saída do condensador :

#

```

SE Fz_err_ta2 == muito_neg_err_ta2  ENTAO  Fz_mref = muito_alto_mref;
SE Fz_err_ta2 == neg_err_ta2        ENTAO  Fz_mref = alto_mref;
SE Fz_err_ta2 == zero_err_ta2       ENTAO  Fz_mref = medio_mref;
SE Fz_err_ta2 == pos_err_ta2        ENTAO  Fz_mref = baixo_mref;
SE Fz_err_ta2 == muito_pos_err_ta2  ENTAO  Fz_mref = muito_baixo_mref;

```

```

SE Fz_err_ta2 == muito_neg_err_ta2  ENTAO  Fz_meglic = muito_baixo_meglic;
SE Fz_err_ta2 == neg_err_ta2        ENTAO  Fz_meglic = baixo_meglic;
SE Fz_err_ta2 == zero_err_ta2       ENTAO  Fz_meglic = medio_meglic;
SE Fz_err_ta2 == pos_err_ta2        ENTAO  Fz_meglic = alto_meglic;
SE Fz_err_ta2 == muito_pos_err_ta2  ENTAO  Fz_meglic = muito_alto_meglic;

```

```

SE Fz_err_ta2 == muito_neg_err_ta2  ENTAO  Fz_mag = muito_baixo_mag;
SE Fz_err_ta2 == neg_err_ta2        ENTAO  Fz_mag = baixo_mag;
SE Fz_err_ta2 == zero_err_ta2       ENTAO  Fz_mag = medio_mag;
SE Fz_err_ta2 == pos_err_ta2        ENTAO  Fz_mag = alto_mag;
SE Fz_err_ta2 == muito_pos_err_ta2  ENTAO  Fz_mag = muito_alto_mag;

```

#

Regras referenciadas a Erro na Temperatura do eglicol de saída do evaporador :

#

```
SE Fz_err_tgl == muito_neg_err_tgl  ENTAO  Fz_mref = muito_baixo_mref;
SE Fz_err_tgl == neg_err_tgl         ENTAO  Fz_mref = baixo_mref;
SE Fz_err_tgl == zero_err_tgl        ENTAO  Fz_mref = medio_mref;
SE Fz_err_tgl == pos_err_tgl         ENTAO  Fz_mref = alto_mref;
SE Fz_err_tgl == muito_pos_err_tgl   ENTAO  Fz_mref = muito_alto_mref;

SE Fz_err_tgl == muito_neg_err_tgl  ENTAO  Fz_meglic = muito_alto_meglic;
SE Fz_err_tgl == neg_err_tgl        ENTAO  Fz_meglic = alto_meglic;
SE Fz_err_tgl == zero_err_tgl        ENTAO  Fz_meglic = medio_meglic;
SE Fz_err_tgl == pos_err_tgl         ENTAO  Fz_meglic = baixo_meglic;
SE Fz_err_tgl == muito_pos_err_tgl   ENTAO  Fz_meglic = muito_baixo_meglic;

SE Fz_err_tgl == muito_neg_err_tgl  ENTAO  Fz_mag = muito_baixo_mag;
SE Fz_err_tgl == neg_err_tgl        ENTAO  Fz_mag = baixo_mag;
SE Fz_err_tgl == zero_err_tgl        ENTAO  Fz_mag = medio_mag;
SE Fz_err_tgl == pos_err_tgl         ENTAO  Fz_mag = alto_mag;
SE Fz_err_tgl == muito_pos_err_tgl   ENTAO  Fz_mag = muito_alto_mag;
```

#

Regras referenciadas a Erro na Temperatura de refrigerante de saída do condensador :

#

```
SE Fz_err_t3 == muito_neg_err_t3  ENTAO  Fz_mref = muito_alto_mref;
SE Fz_err_t3 == neg_err_t3         ENTAO  Fz_mref = alto_mref;
SE Fz_err_t3 == zero_err_t3        ENTAO  Fz_mref = medio_mref;
SE Fz_err_t3 == pos_err_t3         ENTAO  Fz_mref = baixo_mref;
SE Fz_err_t3 == muito_pos_err_t3   ENTAO  Fz_mref = muito_baixo_mref;

SE Fz_err_t3 == muito_neg_err_t3  ENTAO  Fz_meglic = muito_alto_meglic;
SE Fz_err_t3 == neg_err_t3        ENTAO  Fz_meglic = alto_meglic;
SE Fz_err_t3 == zero_err_t3        ENTAO  Fz_meglic = medio_meglic;
SE Fz_err_t3 == pos_err_t3         ENTAO  Fz_meglic = baixo_meglic;
SE Fz_err_t3 == muito_pos_err_t3   ENTAO  Fz_meglic = muito_baixo_meglic;

SE Fz_err_t3 == muito_neg_err_t3  ENTAO  Fz_mag = muito_baixo_mag;
SE Fz_err_t3 == neg_err_t3        ENTAO  Fz_mag = baixo_mag;
SE Fz_err_t3 == zero_err_t3        ENTAO  Fz_mag = medio_mag;
SE Fz_err_t3 == pos_err_t3         ENTAO  Fz_mag = alto_mag;
SE Fz_err_t3 == muito_pos_err_t3   ENTAO  Fz_mag = muito_alto_mag;
```

#

Regras referenciadas a Erro na Temperatura de refrigerante de saída do evaporador :

#

```
SE Fz_err_t6 == muito_neg_err_t6   ENTÃO  Fz_mref = muito_baixo_mref;
SE Fz_err_t6 == neg_err_t6         ENTÃO  Fz_mref = baixo_mref;
SE Fz_err_t6 == zero_err_t6        ENTÃO  Fz_mref = medio_mref;
SE Fz_err_t6 == pos_err_t6         ENTÃO  Fz_mref = alto_mref;
SE Fz_err_t6 == muito_pos_err_t6   ENTÃO  Fz_mref = muito_alto_mref;

SE Fz_err_t6 == muito_neg_err_t6   ENTÃO  Fz_meglic = muito_alto_meglic;
SE Fz_err_t6 == neg_err_t6         ENTÃO  Fz_meglic = alto_meglic;
SE Fz_err_t6 == zero_err_t6        ENTÃO  Fz_meglic = medio_meglic;
SE Fz_err_t6 == pos_err_t6         ENTÃO  Fz_meglic = baixo_meglic;
SE Fz_err_t6 == muito_pos_err_t6   ENTÃO  Fz_meglic = muito_baixo_meglic;

SE Fz_err_t6 == muito_neg_err_t6   ENTÃO  Fz_mag = muito_baixo_mag;
SE Fz_err_t6 == neg_err_t6         ENTÃO  Fz_mag = baixo_mag;
SE Fz_err_t6 == zero_err_t6        ENTÃO  Fz_mag = medio_mag;
SE Fz_err_t6 == pos_err_t6         ENTÃO  Fz_mag = alto_mag;
SE Fz_err_t6 == muito_pos_err_t6   ENTÃO  Fz_mag = muito_alto_mag;
```

#

Regras referenciadas a Erro na Temperatura de refrigerante na saída do sub-resfriador :

#

```
SE Fz_err_t1 == muito_neg_err_t1   ENTÃO  Fz_mref = muito_baixo_mref;
SE Fz_err_t1 == neg_err_t1         ENTÃO  Fz_mref = baixo_mref;
SE Fz_err_t1 == zero_err_t1        ENTÃO  Fz_mref = medio_mref;
SE Fz_err_t1 == pos_err_t1         ENTÃO  Fz_mref = alto_mref;
SE Fz_err_t1 == muito_pos_err_t1   ENTÃO  Fz_mref = muito_alto_mref;

SE Fz_err_t1 == muito_neg_err_t1   ENTÃO  Fz_meglic = muito_alto_meglic;
SE Fz_err_t1 == neg_err_t1         ENTÃO  Fz_meglic = alto_meglic;
SE Fz_err_t1 == zero_err_t1        ENTÃO  Fz_meglic = medio_meglic;
SE Fz_err_t1 == pos_err_t1         ENTÃO  Fz_meglic = baixo_meglic;
SE Fz_err_t1 == muito_pos_err_t1   ENTÃO  Fz_meglic = muito_baixo_meglic;

SE Fz_err_t1 == muito_neg_err_t1   ENTÃO  Fz_mag = muito_baixo_mag;
SE Fz_err_t1 == neg_err_t1         ENTÃO  Fz_mag = baixo_mag;
SE Fz_err_t1 == zero_err_t1        ENTÃO  Fz_mag = medio_mag;
SE Fz_err_t1 == pos_err_t1         ENTÃO  Fz_mag = alto_mag;
SE Fz_err_t1 == muito_pos_err_t1   ENTÃO  Fz_mag = muito_alto_mag;
```

#

Regras referenciadas ao Erro do Coeficiente de performance do sistema :

#

```
SE Fz_err_cop == muito_neg_err_cop  ENTÃO  Fz_mref = muito_baixo_mref;
SE Fz_err_cop == neg_err_cop        ENTÃO  Fz_mref = baixo_mref;
```

```

SE Fz_err_cop == zero_err_cop      ENTAO  Fz_mref = medio_mref;
SE Fz_err_cop == pos_err_cop       ENTAO  Fz_mref = alto_mref;
SE Fz_err_cop == muito_pos_err_cop ENTAO  Fz_mref = muito_alto_mref;

SE Fz_err_cop == muito_neg_err_cop ENTAO  Fz_meglic = muito_alto_meglic;
SE Fz_err_cop == neg_err_cop       ENTAO  Fz_meglic = alto_meglic;
SE Fz_err_cop == zero_err_cop      ENTAO  Fz_meglic = medio_meglic;
SE Fz_err_cop == pos_err_cop       ENTAO  Fz_meglic = baixo_meglic;
SE Fz_err_cop == muito_pos_err_cop ENTAO  Fz_meglic = muito_baixo_meglic;

SE Fz_err_cop == muito_neg_err_cop ENTAO  Fz_mag = muito_baixo_mag;
SE Fz_err_cop == neg_err_cop       ENTAO  Fz_mag = baixo_mag;
SE Fz_err_cop == zero_err_cop      ENTAO  Fz_mag = medio_mag;
SE Fz_err_cop == pos_err_cop       ENTAO  Fz_mag = alto_mag;
SE Fz_err_cop == muito_pos_err_cop ENTAO  Fz_mag = muito_alto_mag;

```

#

POSPROCESSAMENTO

```

{
  # Defuzzifica o valor de correcao das vazões mássicas

  Defuzzyfica(Fz_mref);
  Defuzzyfica(Fz_mag);
  Defuzzyfica(Fz_meglic);

  # OBS. : As vazões mássicas estão sendo enviadas ao processo em seus valores absolutos,
  #        não havendo necessidade de ser corrigidas

}
}

```

FIM_REGRAS # fim de programa

VI. 11 . PROGRAMA DE SIMULAÇÃO DINÂMICA

VI. 11 . 1 . PORTUGUÊS ESTRUTURADO

Main ()

```
definir_variáveis ()  
atribuir_constantes ()  
definir_funções ()  
inicializa_variáveis ()  
calcula_propriedades ()  
calcula_COP ()  
salva_dados_arquivo_hist ()
```

label :

```
Se ( condição_final = "verdadeira")  
{  
  fecha_arquivo_hist ()  
end  
}  
Se não  
{ resolve_eqç_difer ()  
  calcula_prop ()  
  calcula_COP ()  
  salva_dados_arquivo_hist ()  
}  
out_put_condições_controlador()  
input_condições_controlador ()  
altera_variáveis ()  
t = t +  $\Delta t$   
returna label :
```

VI. 11. 2 . DESCRIÇÃO DO SIMULADOR DINÂMICO

O usuário deste software tem a facilidade de operação através de ‘telas’ , ‘janelas’ e ‘botões’ optados pelo mouse, descritos a seguir:

a) JANELAS :

Duas ‘telas’ principais são oferecidas pelo software. A primeira possui um “menu” de botões de configuração inicial, um relógio de tempo de simulação e três áreas destinadas a apresentação gráfica dos valores das variáveis (em valores absolutos ou percentuais) impressos em tempo real de simulação, concomitantemente à gravação em arquivo.

A segunda é um croquis do processo com apresentação dinâmica dos valores das variáveis de “bar graph” em tempo real de simulação, sobrepostos aos “bars graph” do valor de set-point. Esta tela é ou não selecionada pelo acionamento do botão . DRAW

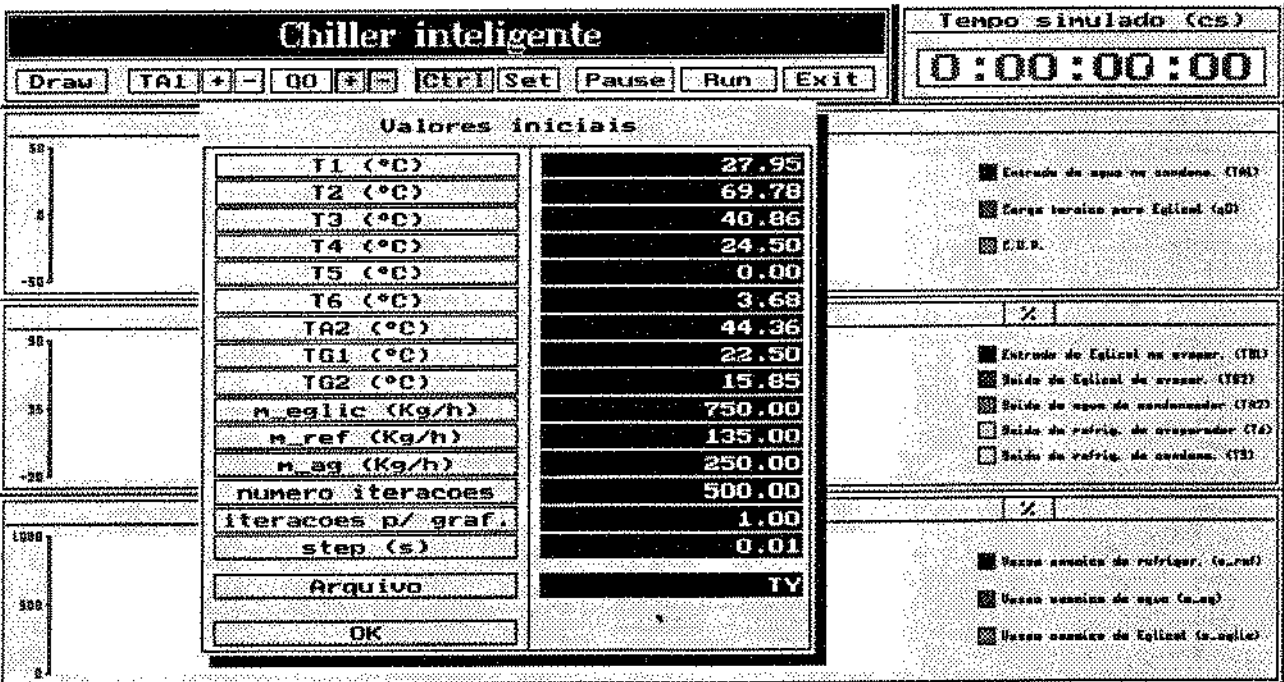


Figura 1 . Tela do simulador dinâmico do processo com os botões de configuração inicial e áreas dos históricos das variáveis com a janela (Valores Iniciais) sobreposta.

b) BOTÕES :

Os botões disponíveis no “menu” da primeira tela ativam ou desativam algumas operações, conforme descritas a seguir :

- * Botões das condições iniciais (, , , , , ,) : são botões que “zeram” o ‘campo’ da variável para seu preenchimento com o novo valor para a execução do processo. Estes valores são gravados em arquivo ‘default’ de parâmetros. Estes botões estão disponíveis na primeira janela aberta após a execução do software.
- * Botão : ativa / destiva apresentação dinâmica gráfica dos valores das variáveis de forma absoluta ou percentual (relativos aos valores de referência).
- * Botão : pára / continua execução da simulação.
- * Botão ou : inicia / reinicia a execução da simulação, ativando janela de configuração de valores iniciais.
- * Botão : ativa janela para renovação de valores de set-point, gravando-os em arquivo ‘default’.
- * Botão : finaliza a execução do programa, fechando o arquivo de dados, já denominado na configuração inicial.
- * Botão : ativa uma janela de opções de lógicas de controle a ser utilizada. A opção de uma das lógicas de controle inabilita a outra (caso : fuzzy ou on-off) :
 - = Botão : zera o ‘campo’ do valor do número de iterações de simulação em que os valores das variáveis do instante será enviada para a rotina de controle escolhida. Esta opção permite comunicar com o controlador em ‘passo’ diferente de tempo de simulação.
 - = Botão : habilita a conversão dos valores das variáveis para comunicação com o hardware (controlador);
 - # Botão : habilita o tipo de valores das variáveis a ser comunicado com a rotina de controle fuzzy. Os tipos são : ERRO das variáveis (diferença do valor atual com o set-point) e VALOR das variáveis de forma absoluta;

= Botão **ON-OFF** : habilita a opção de controle on-off para controlar a variável TG1;

Botão **Delta_TG1** : zera o 'campo' do valor do erro admissível da variável TG1 (diferença do valor absoluto com o set-point);

* Botões **OK** : acata opções selecionadas;

* Botão **TA1** : ativa janela de pré-configuração de perturbações da temperatura da água de entrada no condensador. Há duas possibilidades de perturbações : em Degrau ou numa Função Senoidal :

= Botão **TIPO** : ativa perturbação na opção degrau ou função ;

= Botão **MEDIA** : zera o "campo" do valor médio para preenchimento do valor desejado, caso optado anteriormente o tipo de perturbação como Função;

= Botão **AMPLIT.** : zera o "campo" do valor da amplitude da função senoidal para o preenchimento de novo valor;

= Botão **PERÍODO** : zera o "campo" do valor do período da função senoidal para o preenchimento de novo valor;

= Botão **DEGRAU** : zera o "campo" do valor da percentagem de perturbação em modo degrau

= Botões **+** e **-** : incrementa, positivo ou negativamente, o valor da variável de perturbação no valor pré-estipulado no botão DEGRAU, durante a execução da simulação;

* Botão **Qo** : ativa a janela de pré-configuração de perturbação da carga-térmica aplicada ao aquecimento do etileno glicol no reservatório Tank . Da mesma forma que o botão **TA1**, este apresenta os mesmos tipos de opções.

* Botão **DRAW** : seleciona a tela que está executando em back-ground (croquis do processo ou gráfico dinâmico).

A apresentação dos históricos das variáveis pode ser personalizado pela escolha de quais variáveis queira ser mostradas. Para isto, é necessário pressionar o botão do mouse dentro da área

disponível de uma das três áreas de apresentação do histórico das variáveis, e então abre-se uma janela com botões específicos que desabilita ou habilita cada apresentação de variáveis.

Para a área de gráfico de histórico de vazões mássicas [kg/h] , tem-se os seguintes botões :

*

*

*

Para a área de gráfico de histórico de temperatura [°C], figura 2, tem-se os seguintes botões:

*

*

*

*

*

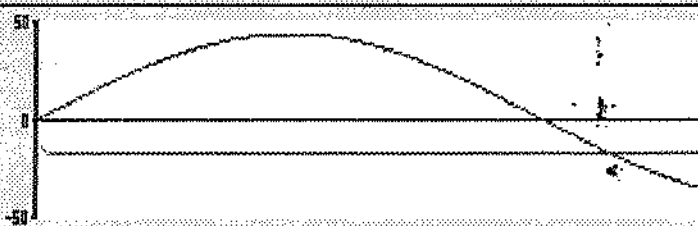
Chiller inteligente

Tempo simulado (cs)

0:00:03:28

Draw TA1 + - 00 Ctrl Set Pause Start Exit

Variacao (%)

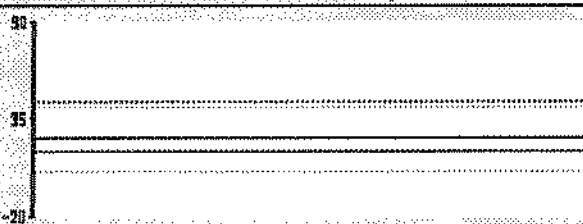


0.000% Entrada de agua no condens. (TA1)

-35.597% Carga termica para Eglicol (q0)

-17.895% C.O.P.

Temperaturas (°C)



Entrada do Eglicol no evapor. (TG1)

Saida do Eglicol do evapor. (TG2)

Saida da agua do condensador (TA2)

Saida do refrig. do evaporador (T6)

Saida do refrig. do condens. (T3)

(TG1)

(TG2)

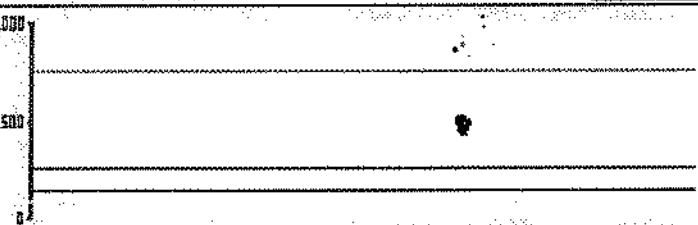
(TA2)

(T6)

(T3)

OK

Vazoes massicas (kg/s)



135.000 Vazao massica do refriger. (a.ref)

250.000 Vazao massica da agua (a.ag)

750.000 Vazao massica do Eglicol (a.eglic)

Figura 2 . Tela do simulador dinâmico do processo em execução com janela de opções de ativação de variáveis a serem graficadas.

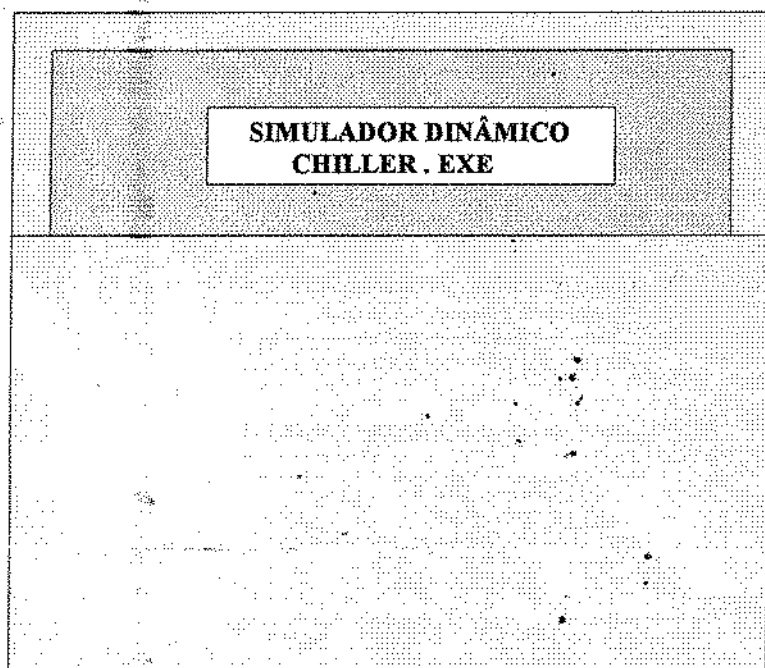
Para a área de gráfico de histórico de “variação [%]”, tem-se os seguintes botões :

* Entrada de água no condensador

* Carga térmica para Eglicol

* C.O.P.

VI. 11. 3. PROGRAMA SIMULADOR DINÂMICO



Desenvolvido por
Prof. Dr. Eng.º