

# AUTOMATIZAÇÃO DE UM SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO POR ABSORÇÃO A GÁS NATURAL ATRAVÉS DA LÓGICA FUZZY

Marcelo Magalhães Ávila Paz

LES/UFPB, Cidade Universitária, Campus I, João Pessoa, CEP 58059 900.

Fone: 83 216 7225. [marcelo@les.ufpb.br](mailto:marcelo@les.ufpb.br)

Carlos Antônio Cabral dos Santos

LES/UFPB, Cidade Universitária, Campus I, João Pessoa, CEP 58059 900.

Fone: 83 216 7225. [cabral@les.ufpb.br](mailto:cabral@les.ufpb.br)

Anselmo de Oliveira Carvalho

UPE, Universidade de Pernambuco, Recife, CEP 50610 320.

Fone: 81 3422 2122. [Anselmo@termoeletro.com.br](mailto:Anselmo@termoeletro.com.br)

Francisco Antônio Belo

LES/UFPB, Cidade Universitária, Campus I, João Pessoa, CEP 58059 900.

Fone: 83 216 7225. [belo@les.ufpb.br](mailto:belo@les.ufpb.br)

## Resumo

Apresenta-se o estudo teórico do controle dos elementos do sistema de refrigeração por absorção de simples efeito usando o par água-brometo de lítio em desenvolvimento no Laboratório de Energia Solar da Universidade Federal da Paraíba através do uso da lógica Fuzzy. É feita uma simulação em programação gráfica LabVIEW onde o valor de vazão de água gelada é controlado através da lógica de programação. A lógica Fuzzy ajusta as vazões das bombas de circulação de fluido refrigerante, bombeamento da torre de arrefecimento e água de condensação, que são as variáveis que determinam as condições de contorno para um estado do sistema térmico previamente determinado através da análise termodinâmica. A automação se dá pela ação da lógica de programação que é alimentada por sinais provindo de um sistema de aquisição de dados que utiliza uma rede FieldBus para ler sinais de temperatura e pressão. Os cálculos são feitos para cada elemento do sistema e o resultado é transformado em sinais de controle que irá atuar através de reguladores de freqüência que modificam a velocidade de rotação das bombas de circulação, controlando, desta forma, as vazões nos pontos determinados para mudança de estado em cada elemento.

**Palavras-Chave:** *Lógica Fuzzy, Sistemas Térmicos, Fontes Alternativas.*

## 1. INTRODUÇÃO

Automatizar um sistema significa estabelecer procedimentos que permitam manter ou modificar as condições de operação sem intervenção humana. Um sistema automatizado requer sensores, atuadores, transdutores, microprocessadores, registradores e mostradores interligados formando uma rede com fins bem determinados. Este trabalho tem por objetivo descrever os métodos que serão utilizados para seleção dos equipamentos e estrutura de automação para o projeto de DESENVOLVIMENTO DE TECNOLOGIA E SISTEMAS PARA CLIMATIZAÇÃO E COGERAÇÃO USANDO GÁS NATURAL em desenvolvimento no LES (Laboratório de Energia

## 2. A Rede de Aquisição de Dados

O projeto para Climatização e Cogeração Usando Gás Natural consiste em refrigerar um ambiente de forma indireta através do processo de absorção usando como fluido refrigerante o par brometo de lítio e água. Este deve ser automatizado para evitar a cristalização do brometo de lítio, que pode ocorrer a baixas temperaturas, o que causaria o estrangulamento do sistema e a falha operacional (Santos e Varani, 2000). A análise termodinâmica do sistema permite observar a importância do controle das vazões das bombas de fluido refrigerante de baixa e alta concentração, da bomba de circulação de água de arrefecimento do absorvedor e condensador. Para o controle das vazões destas bombas, é importante a leitura em tempo real do estado do fluido refrigerante. Esta medida será feita com termômetros de platina PT100, com leituras de temperatura direta e indireta e sensores de pressão (Paz, 2003). Os sensores fornecem sinais analógicos na faixa de 4-20 mA. Estes sinais necessitam de amplificação e tratamento para reduzir interferências ambientais e redução de ruídos. Os sensores deverão ser fixados de forma a minimizar as inércias térmicas do sistema e as forças dinâmicas nos sensores.

Os sensores são responsáveis pela coleta das tensões que representam um dado de temperatura ou pressão. Estes dados são armazenados em um sistema digital que agrupa a informação em palavras com vários bits para ser distribuída em uma rede local. Para a seleção dos equipamentos é necessário definir o tamanho da informação e a velocidade com que estas informações serão transmitidas (Coghi, 2003). Para isto, a automação em rede é dividida em 4 grupos básicos de equipamentos, são eles: equipamentos do grupo 1. São os equipamentos que estão no campo (região a ser medida) com tempos de milissegundos (sensores e atuadores discretos ou liga-desliga). O grupo 2: são os equipamentos ditos inteligentes, entre estes estão os medidores contínuos, com velocidade de dezenas de milissegundos (transdutores e transmissores); Os equipamentos do grupo 3, são aqueles que têm como característica a informação, com velocidade de centenas milissegundos (módulos de aquisição) e finalmente os equipamentos do grupo 4, estes com velocidade de informação de dezenas de segundos. Entre eles estão as CLPs (Controlador lógico Programável), informática corporativa em uma LAN (Local Area Network) e o microcomputador de supervisão, ver Fig.(1).

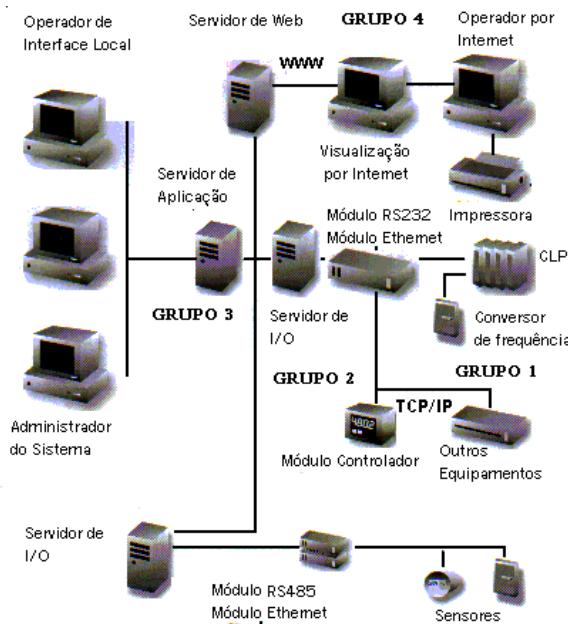


Figura 1 – Rede FieldBus interligando os grupos 1, 2, 3 e 4.

A automatização sugerida neste trabalho abrange todos estes grupos de equipamentos em uma estrutura de informática corporativa, que já é conhecida no mercado. A mais difundida é a rede Ethernet TCP/IP, esta padronizada pelo modelo ISO (Open System Interconnection) que define uma estrutura aberta onde os fabricantes dos equipamentos classificados de 1 a 4 podem aderir aos protocolos de uso geral e irrestrito de propriedade de marca. Através deste conceito pode-se colocar equipamentos de quaisquer fabricantes para comunicar-se entre si. Portanto não existe um modelo de rede comercial bem definido que possa resolver a solução de uma arquitetura híbrida que tem como característica o transporte de informação desde o ponto de medida até a rede de informática corporativa e vice-versa.

Por existir diversas soluções para montar uma rede de informática corporativa é importante escolher os parâmetros elétricos, lógicos e de protocolos para a arquitetura da rede. A rede mais utilizada em indústrias é a FieldBus Foundation (rede de campo) (Matias, 2003) onde se comunicam sistemas de supervisão SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) e CLPs (Controladores lógicos programáveis) de grande porte. Este tipo de rede apresenta um menor custo do que o SDCD (Sistemas Digitais de Controle Distribuído) (Carvalho, 2003).

Partindo para análise do grupo 1. Neste grupo será utilizado sensor e atuador que possuem saídas elétricas. As características dos sensores são descritas na Tab. (1) e dos atuadores na Tab (2).

Tabela 1. Característica dos sensores de Temperatura e Pressão.

Características	Pressão	Temperatura
Tipo de sensor	Piezoresistivo	Resistivo de platina
Faixa de operação	0 a -100 mBar	0 a 150 °C
Temp. de operação	20 a 80 °C	20 a 80 °C
Sensibilidade	2,5 mV/V	0,3 mV/V
Alimentação	12V	5V e 12V
Saída	4 a 20 mV	4 a 20 mV
Resist. de ponte	12K7Ω	100Ω
Cabo elétrico	AWG 4 x 22	AWG 4 x 26
Comprimento do cabo	10 m	10 m

Tabela 2. Característica de atuadores.

Características	Inversor de Freqüência	Inversor de Freqüência
Fabricantes	METALTEX	WEG
Modelo	E2-201-H1	CFW08
Saídas	2,3 a 4,2 A	1,6 a 10 A
Fase	Monofásico/Trifásico	Trifásico
Software	IHM	IHM
Protocolo	RS485	RS232 ou RS485
Veloc. de trans.	38400 bps	-
Freq. de saída	400 Hz	-
Palavra	16 bits	-

Outros instrumentos visuais são conectados ao sistema, estes darão valores que exprimem os comportamento dos elementos do sistema para um ajuste de pressões e vazões iniciais. Estes equipamentos não têm saídas elétricas. São eles: rotâmetros, manovacuômetros e medidores de nível.

Os equipamentos do grupo 2, são os equipamentos conceituados como inteligentes, entre estes estão os medidores contínuos, com velocidade de dezenas de milissegundos (transdutores e transmissores). A Tabela (3) especifica alguns equipamentos deste grupo para uso na rede FieldBus.

Tabela 3. Característica de Transdutores.

Características	Módulos de entradas analógicas	Módulos de entradas analógicas
Fabricantes	National Instrument	Altus
Modelo	FP-RTD-124	QK1116
Diferencial	4 fios	4 fios
Resolução	16 bits	12 bits
Entradas	8	8
Configuração p/ canal	sim	sim
Isolação Vmrs	2300	-

Os equipamentos do grupo 3 são aqueles que têm como característica a informação, com velocidade de centenas milissegundos (módulos de aquisição). A Tabela (4) especifica alguns destes equipamentos.

Tabela 4. Característica de módulos CPU.

Características	Produto	Produto
Fabricante	National Instruments	Altus
Modelo	FieldPoint NI FP-100	PO3045
Protocolo	RS232C	RS232C
Capacidade de exp.	25 mod. p/ barram.	30 mod. p/ barram.
Software	LabVIEW	Mastertool MT4000
Velocidade	115,2 Kb/s	-
Plataforma	Windows	Windowws
Cabeamento	1x8 par trançado	1x8 par trançado

Os equipamentos do grupo 4 são os com velocidade de informação de dezenas de segundos. Entre eles estão ainda os CLPs, a informática corporativa e o microcomputador supervisório. A Tabela (5) mostra alguns softwares utilizados nestes equipamentos.

Tabela 5. Exemplos de software utilizados para programação.

Característica	LabVIEW	Mastertool MT4000	IdownTime
Fabricante	National Instruments	Altus	General Eletric
País	USA	Brasil	USA
Plataformas	Windows e Linux	Windows	Windows

A rede FieldBus transforma os sinais analógicos dos sensores, na faixa de 4 a 20 mA, para sinais digitais, bidirecionais, que são traduzidos em informações e são lidas e interpretadas através da rede que processa estes sinais e transforma em sinais de controle que serão transformados em ação através de um atuador. A característica de resolução está associada a grandeza do sinal a ser medido.

Os equipamentos do grupo 2 são ditos inteligentes por possuírem um microprocessador interno. Os dispositivos são habilitados para funções próprias de diagnóstico, controle, manutenção e capacidade de comunicação bidirecional (Tomas, 1997). A Rede de Campo substitui a rede de

controle centralizada pela rede de controle descentralizada. A interligação dos dispositivos é da forma serial, ramificada ou anel o que reduz bastante a quantidade de fios e conexões (Lopes, 2000).

### **3. EXPANSÃO DA REDE**

Os fabricantes de sistemas de FieldBus, tais como: Altus, NI (National Instruments) e GE (General Electric) buscam maior a melhor performance para seus próprios produtos. A solução para sistemas proprietários está na intercambiabilidade através do uso de gateway, que permite a interação dos diversos dispositivos e sistemas mantendo a integralidade da arquitetura.

Cada sistema FieldBus para ter aceitação, dever ser padronizado, possuir arquitetura modular de controle aberta, flexibilidade e expansão, aceitando diversos dispositivos de vários fabricantes.

### **4. PROGRAMAÇÃO DE CONTROLE**

Através de software de supervisão de cada fabricante, e com a rede montada, é desenvolvida a programação, que coleta os dados digitais através da rede, previamente endereçada, em cada equipamento, respeitando a constante de tempo: dos sensores, atuadores e os equipamentos de transferência de informações.

O programa supervisor possui uma interface facilmente interpretada pelo usuário. O usuário determina a configuração e velocidade de leitura dos sensores e a disposição dos equipamentos dentro de um layout que pode ser a planta do sistema.

O controle da planta do sistema de refrigeração por absorção será realizado por programação G ou gráfica através do programa de instrumentação LabVIEW desenvolvido pela National Instruments.

### **5. LÓGICA FUZZY (LÓGICA NEBULOSA)**

A lógica nebulosa é um tipo de lógica de controle que permite a existência de muitos valores intermediários em comparação com os controles convencionais que utilizam os extremos: sim ou não, quente ou frio e ligado ou desligado. A lógica nebulosa reconhece pequenas variações entre os extremos (Zadeh, 1965). Assim, pequenas variações de temperaturas podem ser divididas em uma grande quantidade de posições. Conceitos como: frio, muito frio, moderado, quente, muito quente e outros podem ser formulados matematicamente, por funções de pertinência triangular ou sigmóide, e processados através de micro controladores.

A lógica Fuzzy permite fazer um controle robusto em variáveis não lineares e sem precisão nos dados. Pode ser alterado facilmente ou modificado totalmente.

A construção das regras Fuzzy, (Cavalcanti, 2000), são determinadas por funções de pertinência ou termos lingüísticos ZE(x), NE(x) e PO(x) que são formadas por duas funções auxiliares na forma  $v(x) = ax+b$  tal que  $0 \leq V(x) \leq 1$ . Para cada variável do problema é determinado um conjuntos de funções pertinentes. Fazendo variar x, encontra-se o valor da função pertinência que, depende se a escolha é pelo valor máximo ou centro de gravidade.

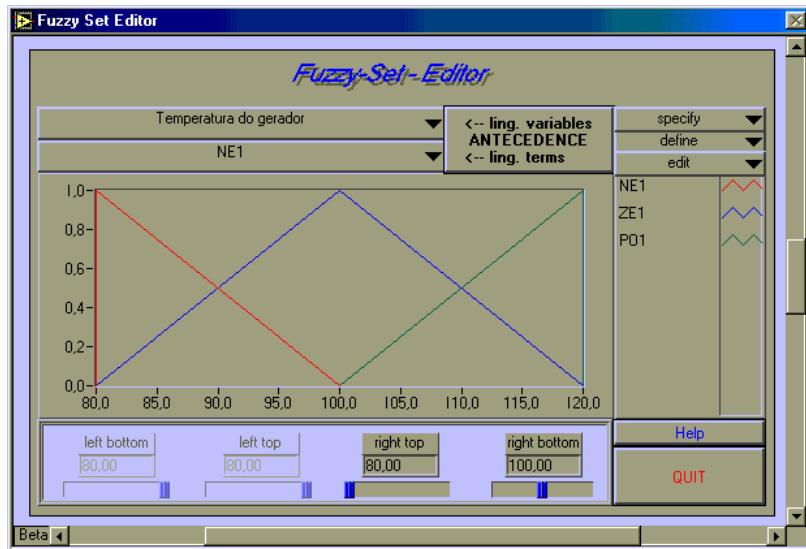


Figura 2. Exemplo de fuzzyficação.

## 6. CONTROLE FUZZY INVERSO

Os estudos teóricos e a simulação no LabVIEW do comportamento dinâmico da planta do sistema de refrigeração permite estimar a temperatura do gerador variando de 80 a 120°C e a temperatura da água gelada de retorno variando entre 0 e 25°C para uma variação da vazão da bomba de solução diluída variando de 0,1 a 1,1 l/s (Carvalho e Belo, 2003).

Estes parâmetros são os valores de referência para a entrada  $Y_{rf}(t)$ , como mostra a Fig. (3), no módulo fuzzyficação, ação de construir as regras das funções de pertinência. Em seguida, os valores de referência da planta na forma Fuzzy  $Y_{rf}$  são analisados pelos Módulos Regras IF-THEN que geram os valores de controle na forma Fuzzyficado  $U_f$ . Por último, os valores das regras são defuzzyficados e geram valores discretos (numérico) para controle  $U(t)$ . Neste tipo de controle deve-se conhecer todos os parâmetros de controle da planta.

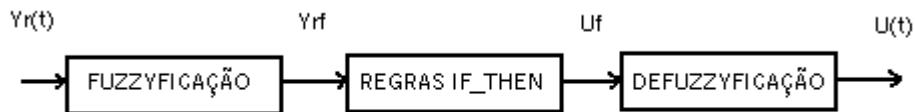


Figura 3. Controlador Fuzzy Inverso.

## 7. PROGRAMAÇÃO LabVIEW

O LabVIEW dispõe de uma ferramenta que constrói as regras chamada Fuzzy Lógic Controller Design, no menu Tools. O usuário determina as duas variáveis com os limites máximos e mínimos e a saída de acordo com as regras pré-estabelecidas. O programa gera uma tabela que é armazenada com terminação .fc para depois serem utilizadas na programação em linguagem gráfica. A linguagem gráfica é constituída de blocos funcionais chamado de VIs (virtuais instruments). Os blocos possuem uma estrutura sistêmica com entradas e saídas. Todas as estruturas de programação das linguagens textuais estão presentes e mais alguns blocos próprios de interface.

A programação para o bloco Fuzzy é mostrada na figura 4. O bloco Fuzzy Control necessita de entradas: *in1*, *in2* e *Name1*, *Name2*, *Data*, fornecidas pelo bloco *load control*. As saídas são: *controller out*, *output assessment* e *error check*. A saída pode ser ainda normalizada como mostra o bloco *%span*.

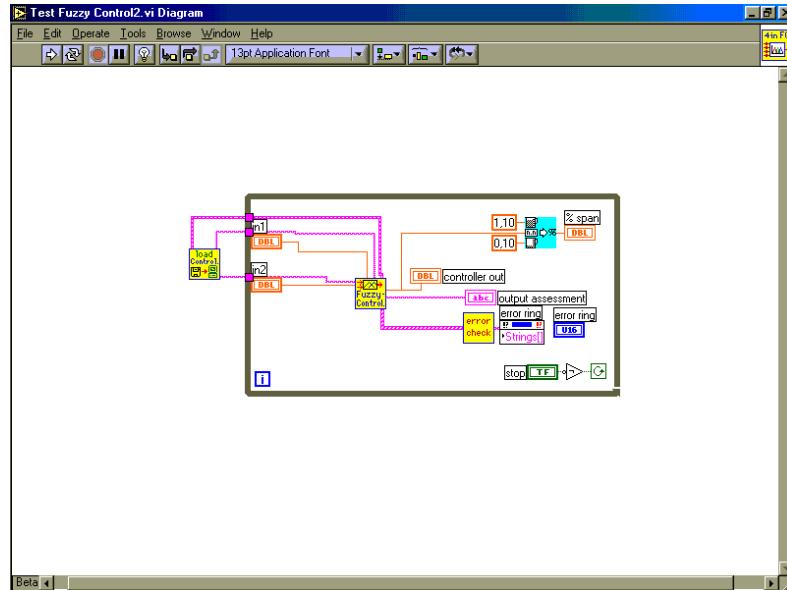


Figura 4. Exemplo de programação G do LabVIEW.

Para formar a matriz de entrada que servirá como *dados* no bloco *Load control*. Utilizando a ferramenta de montagem de regras *Fuzzy Logic Controller Design* no menu *Tools*. Ao abrir aparece uma janela *Fuzzy-Logic toolkit* com as opções *File*, *Edit*, *Test* e *Help* no menu principal.

Ao iniciar em *File*, *New*, aparece os termos lingüísticos básicos NE1, ZE1 e PO1 para variáveis *in1* como mostra a Tab. (6) e NE2, ZE2 e PO2 para variável *in2* como mostra a Tab. (7) e -Neo a POo+, como mostra a Tab. (8). Estes dados são calculados automaticamente pelo programa bastando colocar os valores mínimos e máximos desejados. Através das opções: *Specify*, *Define* e *Edit*, pode-se acrescentar mais termos lingüísticos em *Define, add term after* ou *add term before*. Em *Specify* coloca-se o valor máximo e mínimo do intervalo das variáveis em *edit range*; nomeia-se as variáveis, *in1* (temperatura do gerador), *in2* (temperatura da água gelada e *out*, (vazão da bomba de solução) em *rename variable*. Pode-se ainda modificar os nomes dos termos lingüísticos.

Tabela 6. Quadro montado automaticamente através da ferramenta Fuzzy-Logic toolkit com os valores do intervalo máximo e mínimo para variável de entrada Temperatura do gerador.

	Esquerdo baixo	Esquerdo alto	Direito baixo	Direito alto
NE1	80,000	80,000	80,000	100,000
ZE1	80,000	100,000	100,000	120,000
PO1	100,000	120,000	120,000	120,000

Tabela 7. Quadro montado automaticamente através da ferramenta Fuzzy-Logic toolkit com os valores do intervalo máximo e mínimo para variável de entrada Temperatura da água gelada.

	Esquerdo baixo	Esquerdo alto	Direito baixo	Direito alto
NE2	0,000	0,000	0,000	12,500
ZE2	0,000	12,500	12,500	25,00
PO2	12,500	25,000	25,000	25,000

Tabela 8. Quadro montado automaticamente através da ferramenta Fuzzy-Logic toolkit com os valores do intervalo máximo e mínimo para variável de saída Vazão da bomba.

	Esquerdo baixo	Esquerdo alto	Direito baixo	Direito alto
-NEo	0,100	0,100	0,100	0,267
NEo	0,100	0,267	0,267	0,433
-ZEo	0,267	0,433	0,433	0,600
ZEo	0,433	0,600	0,600	0,767
Zeo+	0,600	0,767	0,767	0,933
POo	0,767	0,933	0,933	1,100
POo+	0,933	1,100	1,100	1,100

Ao finalizar em *Quit* aparece a janela *Rulebase-Editor*, Fig. (5), onde deverá ser especificada as regras IF\_THEN desejadas de resposta para o algoritmo defuzzificador com os respectivos pesos Dos. Ao término destes passos deve-se fazer um teste, como mostra a Fig. (6) O teste é feito variando os valores em Temperatura da água gelada e Temperatura do gerador.

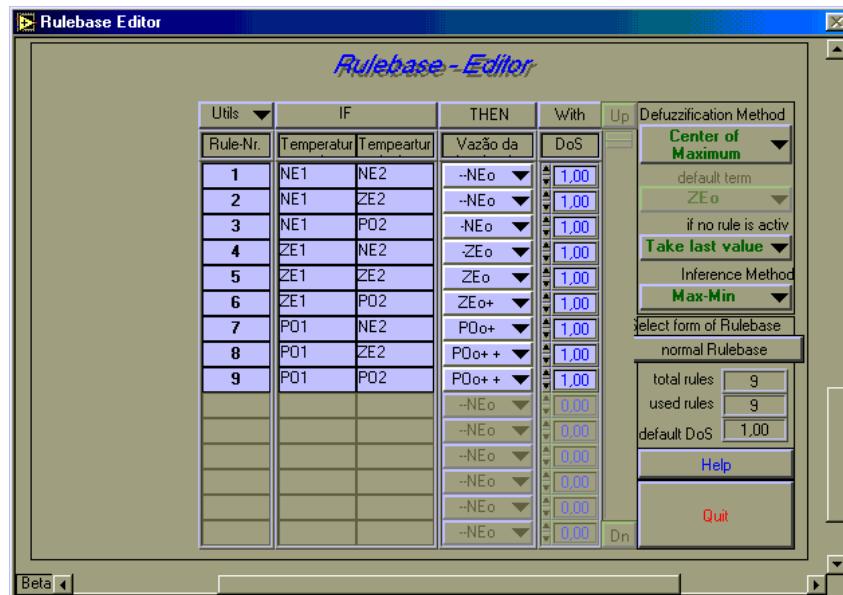


Figura 5. Tela de definição das Regras IF\_THEN e pesos DoS.

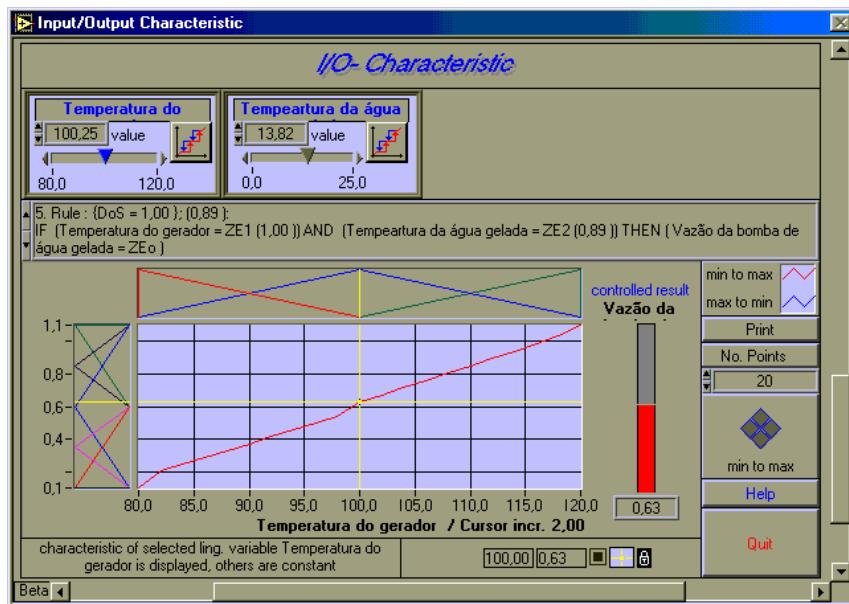


Figura 6. Tela mostrando um teste da saída da lógica Fuzzy.

## 8.CONCLUSÃO

As simulações através do LabIEW mostraram ser possível controlar a vazão de uma bomba, solução diluída, através de duas variáveis: temperatura do gerador e temperatura de água gelada através da lógica Fuzzy. Para a montagem da rede de campo, deve-se optar, entre os diversos fabricantes, uma tecnologia de fácil manutenção e confiabilidade observando a interconexão entre os componentes e as velocidades de transmissão das informações entre os grupos de equipamentos.

## 9.REFERÊNCIAS

- Cavalcanti, J. H. F., 2000. "Sistemas Inteligentes, Redes Neurais Artificiais e Lógica fuzzy", Apostila da disciplina Redes Neurais, João Pessoa, PB.
- Carvalho, P. C., 2003, "Arquitetura de sistemas de automação Industrial", Revista Mecatrônica Atual. n<sup>o</sup> 11, pp. 49-51.
- Carvalho, A. O. e Belo, F. A., 2003. "Controle de Capacidade no Sistema de Refrigeração por Absorção Utilizando o Gás Natural como Fonte de Energia", Dissertação de mestrado, Eng. Mecânica, UFPB.
- Coghi, M. A., 2003, "Revista Mecatrônica Atual", n<sup>o</sup> 11, pp.46-47.
- Lopez, R. A., 2000, "Sistemas de Redes para Controle e Automação", Ed. Book Express Ltda, Rio de Janeiro, RJ.
- Matias, J., 2003, "Fieldbus Foundation", Revista Saber Eletrônica, Ano 38, n<sup>o</sup> 360, pp. 50-55.
- Paz, M. M. A., 2003, "Relatório 2 – Calibração de um Termômetro de Platina" Bolsa DTI CNPq/RHAE, Projeto Desenvolvimento de Tecnologia e sistemas para Climatização e Cogeração Usando Gás Natural. RECOGÁS/FINEPE/CTPETRO, João Pessoa, PB.
- Santos, C. A. C e Varani, C. M. C., 2000, "Análise de Sistemas de Refrigeração", Curso oferecido pela REDE COOPERATIVA DE PESQUISA NORTE NORDESTE DO GÁS NATURAL - RECOGÁS, 1<sup>a</sup> ed., João Pessoa, PB.
- Tomas, R. M., 1997, "Introdução às Redes Locais", Ed. Makron Books, São Paulo, SP.
- Zadeh, L. A., 1965, "Fuzzy Sets, Information and Control".
- Páginas da Web pesquisadas: [www.altus.com.br](http://www.altus.com.br) , [www.gefanuautomation.com](http://www.gefanuautomation.com) , [www.ni.com](http://www.ni.com) , [www.smsc.com](http://www.smsc.com) , [www.weg.com](http://www.weg.com)

# **AUTOMATION OF A SYSTEM OF REFRIGERATION FOR ABSORPTION TO NATURAL GAS THROUGH FUZZY LOGICAL**

Marcelo Magalhães Ávila Paz

LES/UFPB, Cidade Universitária, Campus I, João Pessoa, CEP 58059 900.  
Fone: 83 216 7225. [marcelo@les.ufpb.br](mailto:marcelo@les.ufpb.br)

Carlos Antônio Cabral dos Santos

LES/UFPB, Cidade Universitária, Campus I, João Pessoa, CEP 58059 900.  
Fone: 83 216 7225. [cabral@les.ufpb.br](mailto:cabral@les.ufpb.br)

Anselmo de Oliveira Carvalho

UPE, Universidade de Pernambuco, Recife, CEP 50610 320.  
Fone: 81 3422 2122. [Anselmo@termoeletro.com.br](mailto:Anselmo@termoeletro.com.br)

Francisco Antônio Belo<sup>4</sup>

LES/UFPB, Cidade Universitária, Campus I, João Pessoa, CEP 58059 900.  
Fone: 83 216 7225. [belo@les.ufpb.br](mailto:belo@les.ufpb.br)

## Abstract

It comes the theoretical study of the control of the main elements of the system of refrigeration for absorption of simple effect using the pair Water-Lithium Bromide in development in LES/UFPB through Fuzzy logic. It is made a simulation in graphic programming LabVIEW where the value of flow of cold water is controlled through the programming Fuzzy Logic. Fuzzy Logic adjusts the flow of the bombs of circulation of soda, pumping of the change of heat tower and condensation water, that are the variables that determine the contour conditions previously for a state of the thermal system determined through the thermodynamic analysis having flowed. The automation gives him for the action of the programming Fuzzy Logic that is fed by coming of a system of acquisition of data signs that it uses a net FieldBus to read temperature signs and pressure. The calculations are made for each element of the system and the result is transformed in signs of control that it will act through frequency regulators that modify the speed of rotation of the bombs of circulation, controlling, this way, the flow in the points determined for state change in each element.

keyword: Fuzzy Logic, Thermal Systems, Alternatives Sources.