

METODOLOGIA DE DETERMINAÇÃO DE FUNÇÕES DE PERTINÊNCIA DE CONTROLADORES FUZZY PARA A AVALIAÇÃO ENERGÉTICA DE EMPRESAS DE AVICULTURA DE POSTURA¹

CAMILA PIRES CREMASCO²; LUÍS ROBERTO ALMEIDA GABRIEL FILHO³ & ANGELO CATANEO⁴

RESUMO: O objetivo deste trabalho foi determinar as funções de pertinência para a construção de um controlador *fuzzy* que avalie a situação energética da empresa em relação aos fatores de carga e potência. A avaliação energética de uma empresa é realizada por técnicos e especialistas da área com base nos índices fator de carga e potência, e com análise das máquinas utilizadas nos processos de produção. Esta avaliação é periodicamente realizada para detectar se os procedimentos realizados pelos funcionários em relação à forma de utilização de energia elétrica estão corretos. Com um controlador *fuzzy*, esta avaliação pode ser feita por máquinas. A construção de um controlador *fuzzy* é caracterizada inicialmente pela definição das variáveis de entrada e saída, e suas funções de pertinência associadas. É necessária também a definição de um método de inferência e um processador de saída. Por fim, é necessário o auxílio de técnicos e especialistas para a construção de uma base de regras, composta por respostas que estes profissionais fornecem em função das características das variáveis de entrada. O controlador proposto neste trabalho tem como variáveis de entrada os fatores de carga e potência, e saída a situação da empresa. Suas funções de pertinência representam conjuntos *fuzzy* denominados por qualidades lingüísticas, como “MUITO RUIM” e “BOM”. Com o método de inferência de *Mandani* e o processador de saída do Centro de Área escolhidos, a estrutura de um controlador *fuzzy* fica estabelecida, bastando a escolha de técnicos e especialistas da área energética para determinarem uma base de regras adequada para a empresa escolhida. Desta maneira, a interpretação dos fatores de carga e potência por um software vem ao atendimento da necessidade da criação de um índice único que indica de forma global (racional e eficiente) como a energia está sendo utilizada.

Palavras-chave: Energia elétrica, fator de carga e potência, lógica *fuzzy*.

¹ Parte da tese de doutorado do 1º autor intitulada: Aplicação da lógica fuzzy para avaliação do faturamento do consumo de energia elétrica e demanda de uma empresa de avicultura de postura

² Aluna do curso de PG Energia na Agricultura – FCA/UNESP – Botucatu/SP – Brasil. Docente do curso Logística para o Agronegócio – FATEC – Presidente Prudente/SP – Brasil. camila@fatec.edu.br

³ Docente do curso de Administração – CE/UNESP – Tupã/SP – Brasil. gabrielfilho@tupa.unesp.br

⁴ Orientador e docente do Departamento de Engenharia Rural – FCA/UNESP – Botucatu/SP – Brasil. angelo@fca.unesp.br

METHODOLOGY OF DETERMINATION OF MEMBERSHIP FUNCTIONS OF FUZZY CONTROLLERS FOR ENERGY EVALUATION OF COMPANIES OF POSITION POULTRY KEEPING

SUMMARY: *The objective of this work is to determine the membership functions for the construction of a fuzzy controller to evaluate the energy situation of the company with respect to load and power factors. The energy assessment of a company is performed by technicians and experts based on the indices of load and power factors, and analysis of the machines used in production processes. This assessment is conducted periodically to detect whether the procedures performed by employees in relation to how of use electricity energy are correct. With a fuzzy controller, this performed can be done by machines. The construction of a fuzzy controller is initially characterized by the definition of input and output variables, and their associated membership functions. We also need to define a method of inference and a processor output. Finally, you need the help of technicians and experts to build a rule base, consisting of answers that provide these professionals in function of characteristics of the input variables. The controller proposed in this paper has as input variables load and power factors, and output the company situation. Their membership functions representing fuzzy sets called by linguistic qualities, as "VERY BAD" and "GOOD". With the method of inference Mandani and the processor to exit from the Center of Area chosen, the structure of a fuzzy controller is established, simply by the choice by technicians and experts of the field energy to determine a set of rules appropriate for the chosen company. Thus, the interpretation of load and power factors by software comes to meeting the need of creating a single index that indicates an overall basis (rational and efficient) as the energy is being used.*

Keywords: *Electric energy, power and load factor, fuzzy logic.*

1 INTRODUÇÃO

A região de Bastos-SP é responsável por grande parte da produção brasileira de ovos. Muitas granjas nesta região produzem a própria ração para alimentação de suas aves através da trituração de milho e soja com motores elétricos muitas vezes super-dimensionados, trabalhando em vazio ou em horário de pico. Esta atividade é responsável por grande parte do gasto energético da empresa.

Existem dois fatores que avaliam o modo de utilização desta energia, denominados fator de potência (fp) e fator de carga (fc), que indicam a eficiência e racionalidade da forma de utilização da energia elétrica, respectivamente. Desta forma, surge a necessidade de método para a avaliação global da utilização da energia, levando em consideração os dois fatores citados.

A lógica *fuzzy* estabelece a criação de algoritmos genéticos, que são capazes de imitar parte do raciocínio humano. Esta lógica, sistematizada pela primeira por *Lotfi Asker Zadeh* (ZADEH, 1965), aproxima métodos computacionais e o raciocínio humano, o que possibilita a avaliação global da empresa por métodos computacionais e não mais de especialistas da área energética. Estes métodos são sintetizados criando-se um programa computacional baseado em regras criadas a partir desta lógica, que denominamos controlador *fuzzy*.

Trabalhos na área de engenharia agrícola, tal como (PEREIRA et al., 2008), apresentam sistemas de suporte à decisão com base na teoria dos conjuntos *fuzzy*. Aplicações da lógica *fuzzy* em problemas de contratação de energia elétrica (RODRIGUES et al., 2007) e energias renováveis (VIEIRA et al., 2007) mostram a viabilidade da aplicação desta forma de utilizar informações lingüísticas e quantitativas para controle de sistemas.

O presente trabalho preocupou-se em criar funções de pertinência necessárias na implementação de um controlador *fuzzy* para a avaliação do faturamento do consumo de energia elétrica e demanda de potência ativa e reativa em uma empresa de avicultura de postura. Definidas todas as funções de pertinência deste controlador, é possível utilizar o conhecimento de especialistas diferentes da área energética e construir controladores adequados para cada empresa em estudo.

Definindo as variáveis de entrada como o fator de potência e de carga, e realizando um estudo do comportamento da utilização de energia elétrica no período compreendido entre janeiro de 2005 e dezembro de 2007, foi possível estabelecer funções de pertinência necessárias para uma avaliação mensal para a empresa, de forma a sua situação pertencer às variáveis lingüísticas: “Muito Ruim”, “Ruim”, “Médio”, “Bom” e “Muito Bom”.

Assim, utilizando a metodologia apresentada para a construção de funções de pertinência de um controlador *fuzzy*, para avaliação do uso de energia elétrica e tendo auxílio de técnicos e especialistas para a construção da base de regras, a empresa adquire condições de avaliar seu consumo de energia elétrica instantaneamente. Desta forma, tentar contornar o problema procurando utilizar a energia elétrica de forma eficiente e racional. Neste trabalho, esta metodologia é aplicada para uma empresa de avicultura de postura.

2 MATERIAL E MÉTODOS

A empresa estudada é uma granja composta por vários galpões (Figura 1) que alojam as aves em todas as suas fases.



Figura 1 - Galpões aviários da granja.

A ração utilizada foi fabricada na própria granja, em sua sede em Bastos. Sua composição foi basicamente a mesma, variando a proporção dos ingredientes conforme a fase de vida (conseqüentemente, de produção) da ave. Os ingredientes básicos foram: milho, soja, farinha de carne, girassol, podendo este último ser substituído por trigo ou sorgo, a depender do preço.

Os motores utilizados na granja em estudo foram utilizados para a trituração de milho e soja, como ilustra a Figura 2.



Figura 2 - Motores responsáveis pela trituração do milho para ração das aves.

De acordo com a Companhia Energética de São Paulo (1990), o fator de carga (fc) é o índice que mostra se a energia elétrica está sendo utilizada de forma racional por um determinado consumidor. O fator de potência mensal é fornecido diretamente no relatório descritivo fornecido pela empresa de eletricidade. Visto que o período analisado é de aproximadamente 3 anos de medições, o fator de carga mensal foi calculado através da fórmula:

$$fc = \frac{\text{Energia Ativa}}{\text{tempo} \times \text{Demanda}} \quad (1)$$

A Energia Ativa foi calculada somando-se os valores de “kWh” de ponta com “kWh” fora de ponta descritos nos relatórios de consumo de energia mensais da empresa, e a *Demanda* é obtida pelo valor de “kW”. O *tempo* considerado na relação acima foi de 730 horas.

A partir de dados de energia elétrica de 3 anos da empresa considerada (2005 a 2007), obtiveram-se assim os fatores de potência e carga mensais relativamente a todos os meses do período em estudo.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Resultados teóricos

3.1.1 Lógica Fuzzy

Seja U um conjunto qualquer denominado conjunto universo. Um subconjunto *fuzzy* F de U é caracterizado por uma função $\mu : U \rightarrow [0,1]$, chamada função de pertinência do conjunto *fuzzy* F . O valor $\mu(x) \in [0,1]$ indica o grau com que o elemento x de U está no conjunto *fuzzy* F , com $\mu(x) = 0$ e $\mu(x) = 1$ indicando, respectivamente, a não pertinência e a pertinência completa de x ao conjunto *fuzzy* F . (ZADEH, 1965)

Um conjunto *fuzzy* A é chamado de número *fuzzy* quando o conjunto universo, onde A está definido é o conjunto dos números reais, ou seja, $\mu_A : \mathfrak{R} \rightarrow [0,1]$, e satisfaz as seguintes condições:

- (i) $[A]^\alpha \neq \emptyset, \forall \alpha \in [0,1]$;
- (ii) $[A]^\alpha$ é um intervalo fechado, $\forall \alpha \in [0,1]$;
- (iii) O suporte de A é limitado,

onde $[A]^\alpha = \{x \in U : \mu_A(x) \geq \alpha\}$ e o suporte de A é dado por $\text{supp } A = \{x \in U : \mu_A(x) > 0\}$,

Os números *fuzzy* mais comuns são os triangulares e os trapezoidais. Um número *fuzzy* A é dito triangular se sua função de pertinência é, para $a < b < c$, da forma:

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0, & \text{se } x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & \text{se } a < x \leq b \\ \frac{x-c}{b-c}, & \text{se } b < x \leq c \\ 0, & \text{se } x > c \end{cases}$$

O gráfico de um número *fuzzy* triangular tem a forma de um triângulo, tendo como base o intervalo $[a,c]$ e, como único vértice fora da base, o ponto $(b,1)$. Deste modo, os números reais a , b e c definem o número *fuzzy* triangular A (Figura 3).

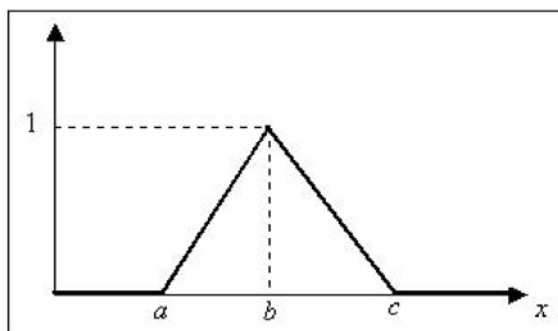


Figura 3 - Número *fuzzy* triangular.

Um número *fuzzy* A é dito trapezoidal (Figura 4) se sua função de pertinência é, para $a < b < c < d$, da forma:

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0, & \text{se } x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & \text{se } a < x \leq b \\ 1, & \text{se } b < x \leq c \\ \frac{x-c}{b-c}, & \text{se } c < x \leq d \\ 0, & \text{se } x > d \end{cases}$$

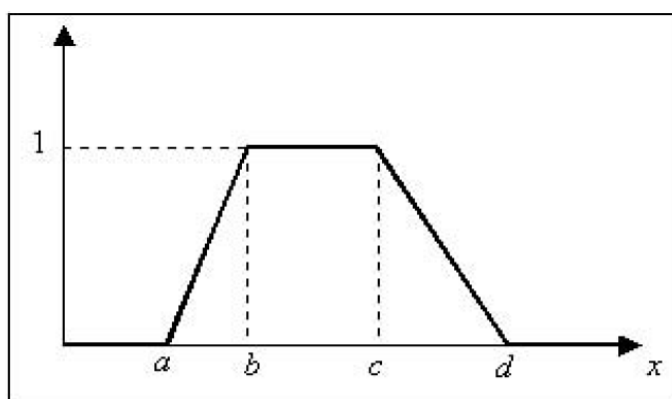


Figura 4 - Número *fuzzy* trapezoidal.

3.1.2 Controlador *Fuzzy*

Para a avaliação da utilização da energia elétrica por uma empresa, estuda-se a eficiência e racionalidade energética através do fator de potência e fator de carga, respectivamente. A avaliação simultânea destes parâmetros é feita a seguir através de um sistema baseado em regras *fuzzy*.

Basicamente, um sistema baseado em regras *fuzzy* possui quatro componentes: um processador de entrada, um conjunto de regras lingüísticas, um método de inferência *fuzzy* e um processador de saída, gerando um número real como saída (RIBACIONKA, 1999). A Figura 5 ilustra o sistema baseado em regras *fuzzy* desenvolvido.

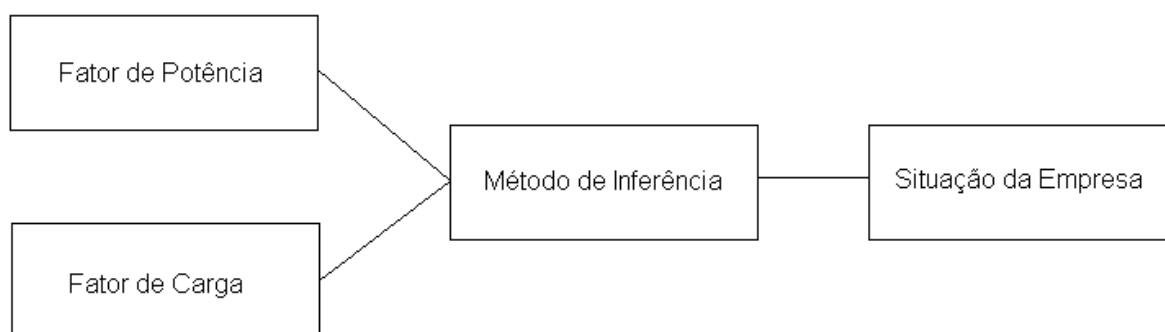


Figura 5 - Sistema baseado em regras *fuzzy*.

O processador de entrada é caracterizado pelas variáveis de entrada do controlador *fuzzy*, que são definidas pelo fator de potência (fp) e fator de carga (fc), e denota-se $x = fp$ e $y = fc$. Para cada variável de entrada, definem-se os conjuntos *fuzzy* associados pelas variáveis lingüísticas: “Muito Ruim” (MR), “Ruim” (R), “Bom” (B), “Muito Bom” (MB).

É necessário definir as funções de pertinência de cada conjunto *fuzzy* definido para ambas variáveis de entradas fp e fc . Para isto, analisam-se os dados medidos nos meses do período em estudo e determina-se o percentil de cada conjunto nos níveis 33 % e 66 % , e também os pontos de mínimo e máximo. Assim, definem-se as constantes fp_i e fc_i , com $i = 1,2,3,4$, da seguinte forma:

- fp_1 : fator de potência mínimo;
- fc_1 : fator de carga mínimo;
- fp_2 : 33.º percentil do conjunto de dados do fator de potência;

- fc_2 : 33.º percentil do conjunto de dados do fator de carga;
- fp_3 : 66.º percentil do conjunto de dados do fator de potência;
- fc_3 : 66.º percentil do conjunto de dados do fator de carga;
- fp_4 : fator de potência máximo;
- fc_4 : fator de carga máximo.

Desta forma, é possível criar as funções de pertinência para as variáveis de entradas, que são definidas na forma triangular e trapezoidal de acordo com as Figuras 6 e 7.

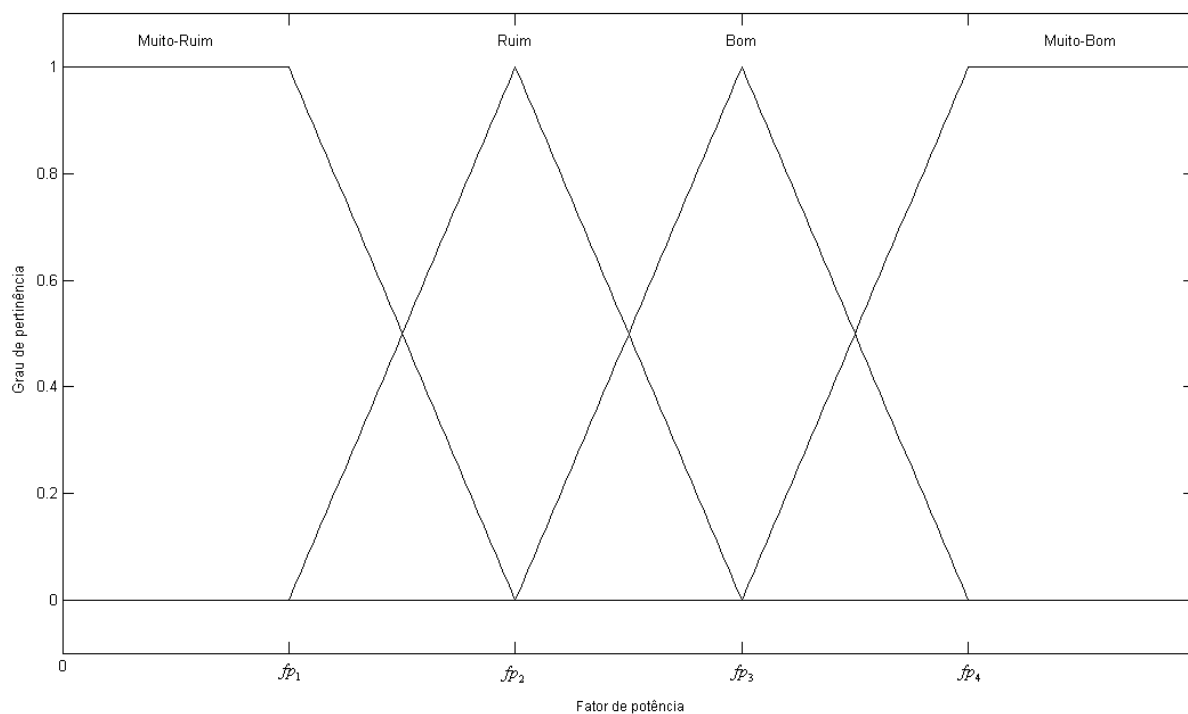


Figura 6 - Funções de pertinência definidas para a variável de entrada fp .

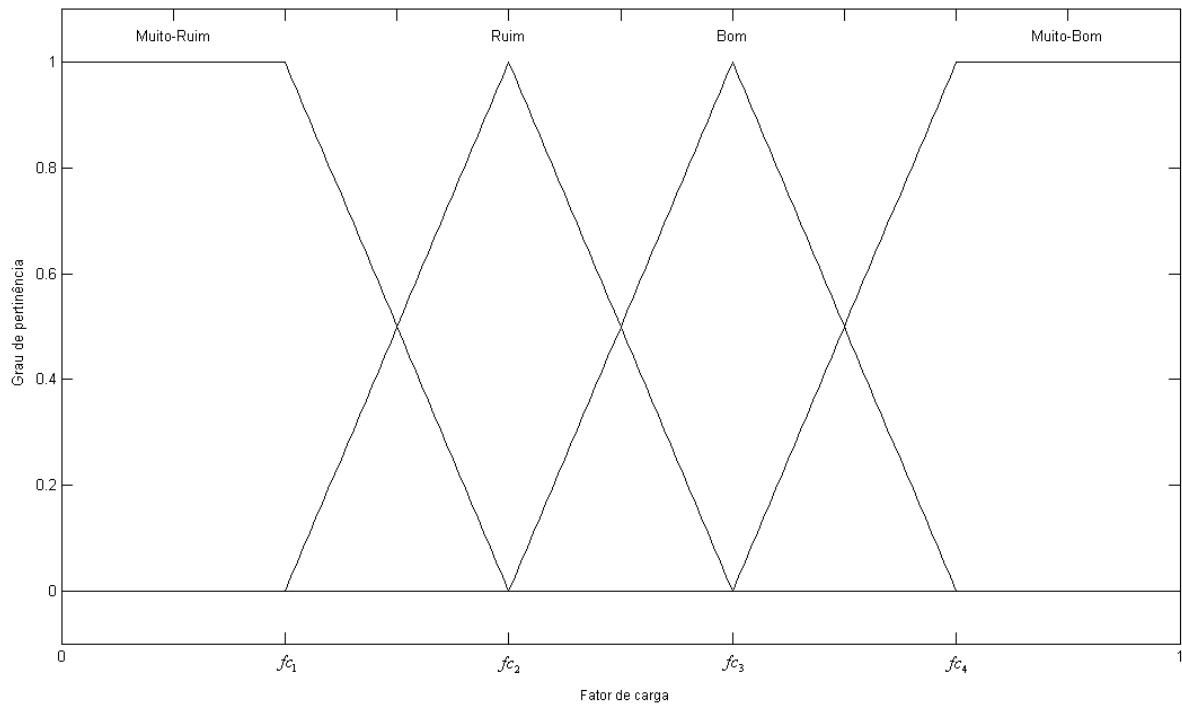


Figura 7 - Funções de pertinência definidas para a variável de entrada fc .

O processador de saída é caracterizado pela variável de saída do controlador, que é definida por um número real no intervalo $[0,1]$ e indica o grau de racionalidade e eficiência da utilização da energia elétrica pela empresa em estudo. Quanto maior este número, melhor será a avaliação da situação energética da empresa. Definem-se os conjuntos *fuzzy* associados pelas variáveis lingüísticas: “Muito Ruim” (MR), “Ruim” (R), “Médio” (M), “Bom” (B), “Muito Bom” (MB).

As funções de pertinência destes conjuntos *fuzzy* são definidas na forma triangular através da partição em 4 intervalos de mesmo comprimento de acordo com a Figura 8.

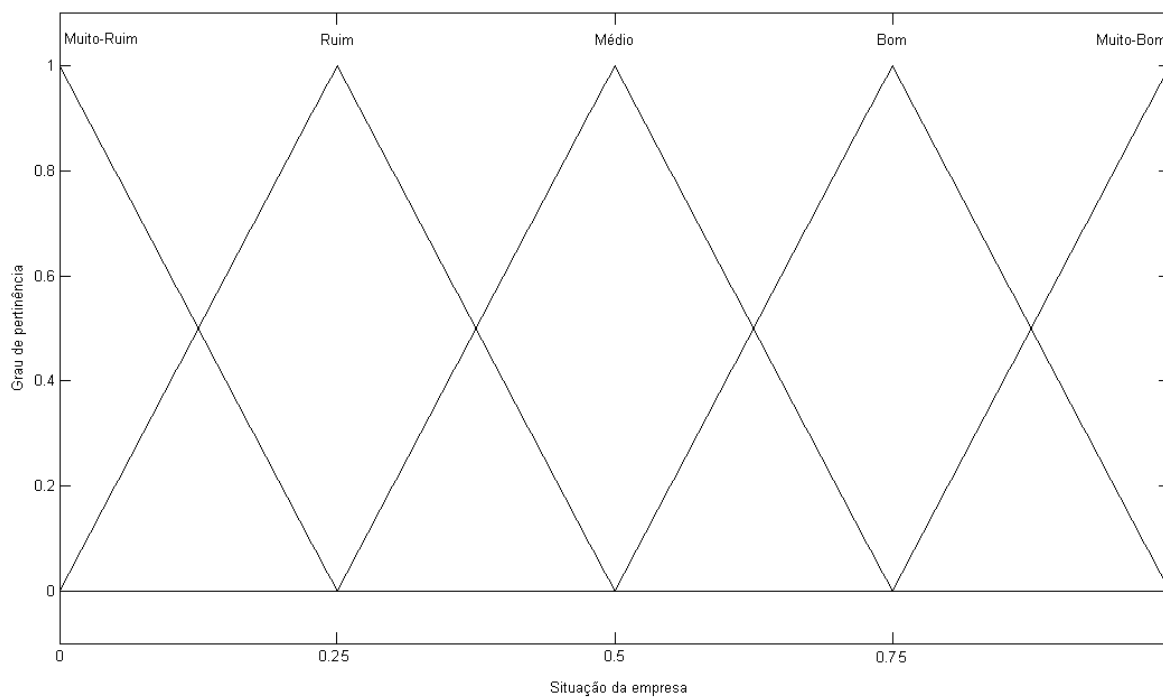


Figura 8 - Funções de pertinência definidas para a variável de saída que avalia a utilização energética da empresa.

O conjunto de regras lingüísticas ou base de regras do controlador *fuzzy* pode ser criado através do auxílio de especialistas e pode ser criado particularmente para cada empresa estudada, conforme a seguinte.

Tabela 1 - Modelo da base de regras do controlador *fuzzy*, onde a coluna “SITUAÇÃO” deve ser completada por especialistas particularizando cada empresa a ser analisada.

<i>fp</i>	<i>fc</i>	SITUAÇÃO
MR	MR	-
MR	R	-
MR	B	-
MR	MB	-
R	MR	-
R	R	-
R	B	-
R	MB	-
B	MR	-
B	R	-
B	B	-
B	MB	-
MB	MR	-
MB	R	-
MB	B	-
MB	MB	-

Assim, utilizando o método de inferência de Mamdani e como processador de saída o Centro de Gravidade, fica completamente determinado um controlador *fuzzy*.

3.2 Resultados práticos

Através da análise das contas mensais de energia elétrica dos anos de 2005, 2006 e 2007, foi possível obter os dados referentes ao uso de energia elétrica sobre consumo ativo e reativo, demanda, fator de potência e os valores calculados do fator de carga, os quais figuram nas tabelas seguintes.

Tabela 2 - Valores mensais de demanda (kW), consumo ativo de ponta (kWh), consumo ativo fora de ponta (kWh), consumo reativo (kVArh), fator de carga (fc) e fator de potência (fp) observados em 2005.

Mês	kWh - ponta	kWh - f. ponta	kW	fc	fp
Jan	0	9290	100,1	0,13	0,74
Fev	2	8757	99,38	0,12	0,69
Mar	0	8129	104,82	0,11	0,71
Abr	11	9536	109,94	0,12	0,72
Mai	22	10943	115,06	0,13	0,73
Jun	17	11289	109,88	0,14	0,72
Jul	7	11899	108,76	0,15	0,73
Ago	385	12098	112,37	0,15	0,73
Set	165	11468	93,67	0,17	0,73
Out	0	10140	100,04	0,14	0,69
Nov	0	11178	99,25	0,15	0,74
Dez	0	12690	99,12	0,18	0,76

Tabela 3 - Valores mensais de demanda (kW), consumo ativo de ponta (kWh), consumo ativo fora de ponta (kWh), consumo reativo (kVArh), fator de carga (fc) e fator de potência (fp) observados em 2006.

Mês	kWh - ponta	kWh - f. ponta	kW	fc	fp
Jan	159	13400	95,18	0,20	0,76
Fev	71	12803	98,92	0,18	0,75
Mar	0	10323	98,79	0,14	0,74
Abr	34	13803	90,39	0,21	0,75
Mai	13	12288	82,85	0,20	0,74
Jun	4	12109	85,8	0,19	0,72
Jul	0	11322	87,96	0,18	0,73
Ago	88	12060	83,18	0,20	0,73
Set	0	11931	84,82	0,19	0,73
Out	0	10484	88,42	0,16	0,72
Nov	17	12195	85,73	0,20	0,74
Dez	0	10215	83,11	0,17	0,74

Tabela 4 - Valores mensais de demanda (kW), consumo ativo de ponta (kWh), consumo ativo fora de ponta (kWh), consumo reativo (kVArh), fator de carga (fc) e fator de potência (fp) observados em 2007.

Mês	kWh - ponta	kWh - f. ponta	kW	fc	fp
Jan	91	11571	81,8	0,20	1,00
Fev	14	11722	85,01	0,19	1,00
Mar	2	9218	77,73	0,16	1,00
Abr	3	7875	73,14	0,15	1,00
Mai	6	7462	69,92	0,15	1,00
Jun	3	9966	72,68	0,19	1,00
Jul	96	10435	76,62	0,19	1,00
Ago	0	12111	78,52	0,21	1,00
Set	5	11881	80,81	0,20	1,00
Out	99	9630	78,72	0,17	1,00
Nov	80	10263	77,8	0,18	1,00
Dez	62	10896	76,88	0,20	1,00

Com os dados das Tabelas 2, 3 e 4, foi possível obter o valor das constantes fp_i e fc_i , para $i = 1,2,3,4$, relativamente aos percentis nos conjuntos de dados de fator de potência e fator de carga em todos meses em estudo. Desta forma, obtêm-se as constantes para o conjunto fator de potência:

$$fp_1 = 0,69, \quad fp_2 = 0,73, \quad fp_3 = 0,78 \quad \text{e} \quad fp_4 = 1,00,$$

e o conjunto fator de carga:

$$fc_1 = 0,11, \quad fc_2 = 0,15, \quad fc_3 = 0,19 \quad \text{e} \quad fc_4 = 0,21.$$

As funções de pertinência para as variáveis de entradas seguem nas Figuras 9 e 10.

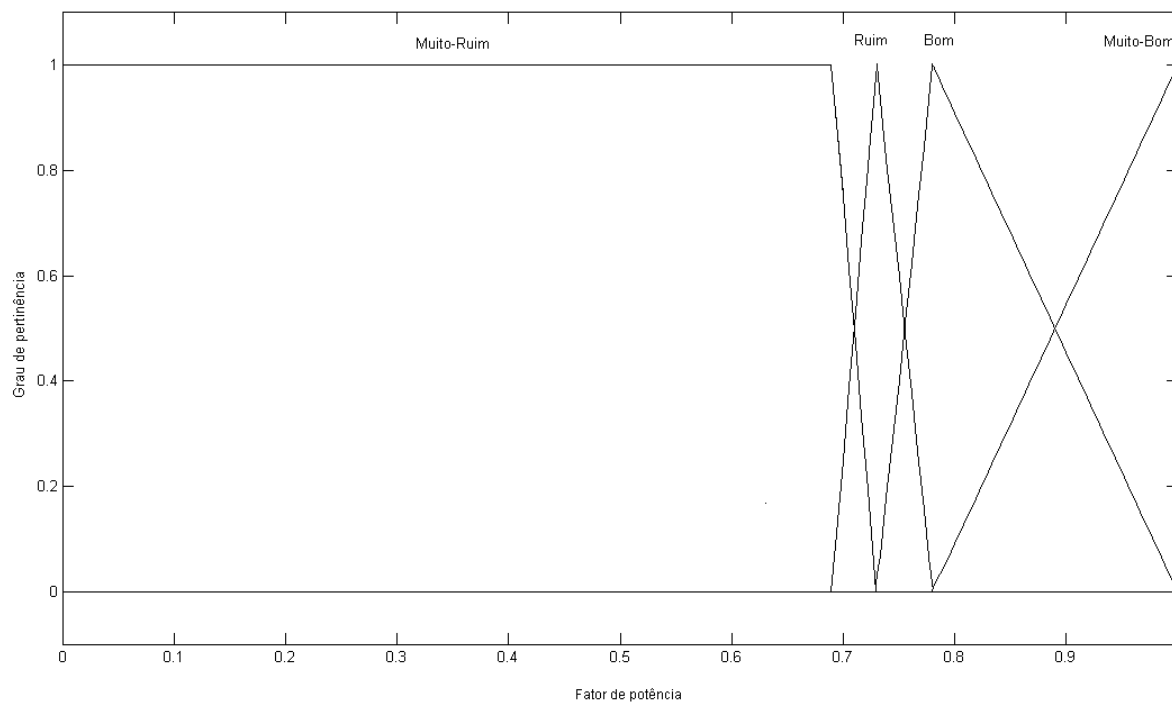


Figura 9 - Funções de pertinência definidas para a variável de entrada fp .

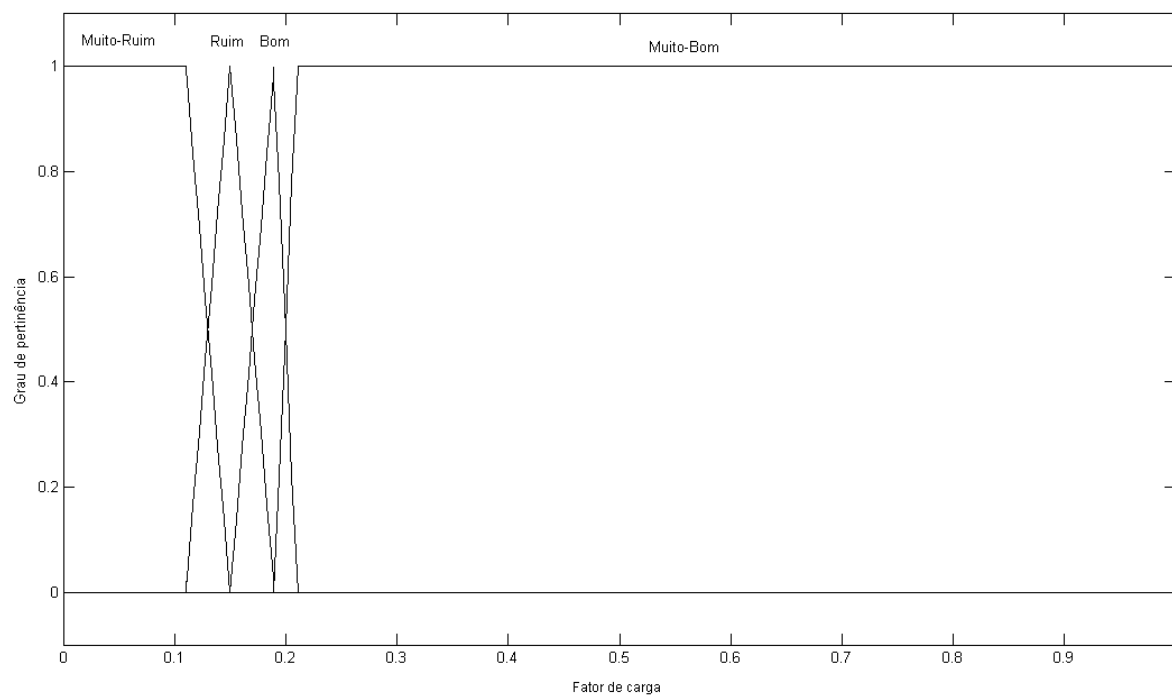


Figura 10 - Funções de pertinência definidas para a variável de entrada fc .

Desta forma, todas as funções de pertinência estão definidas possibilitando a implementação de um controlador *fuzzy*.

Para a realização da implementação computacional das funções de pertinência do controlador *fuzzy*, utilizou-se o *software* MATLAB através do *Fuzzy Logic Toolbox*. O controlador fica caracterizado pela Figura 11, no qual estão representadas as funções de pertinência FP, FC e SITUAÇÃO, além do método de inferência escolhido (*Mamdani*).

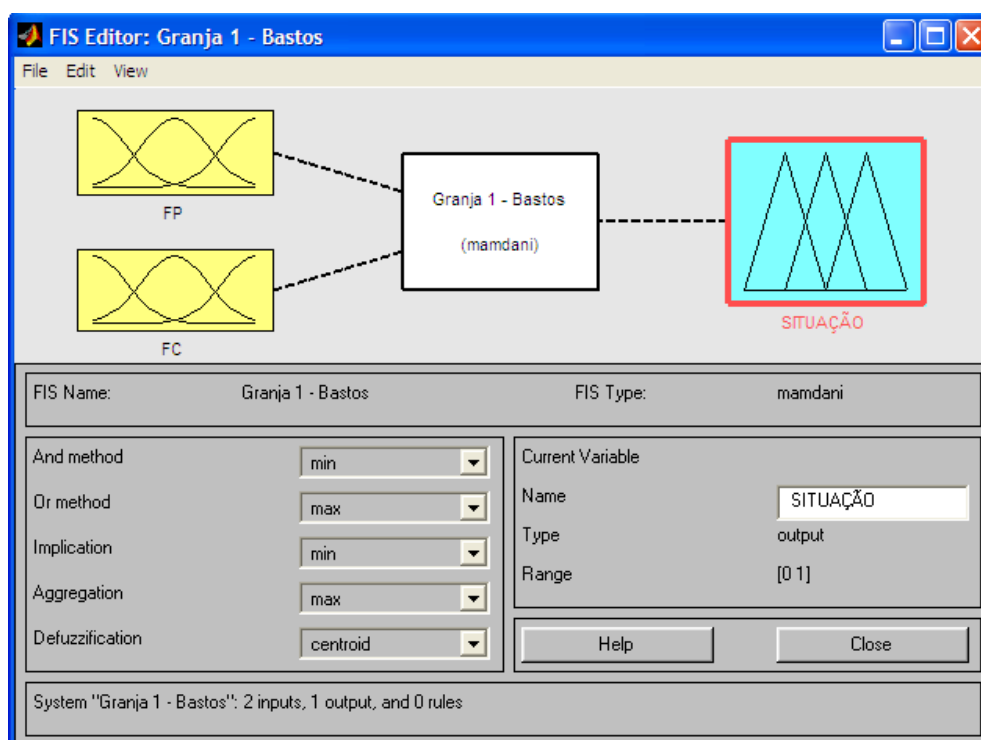


Figura 11 - Caracterização geral do controlador *fuzzy* pelo *software* Matlab.

A base de regras a ser construída com o auxílio de técnicos e especialistas da área energética após a avaliação da empresa deve ser implementada no editor de regras (“Rule Editor”) do *software* Matlab (Figura 12). Para isto, deve-se escolher entre as opções “MUITO-RUIM”, “RUIM”, “BOM” e “MUITO-BOM” para FP e FC. Para SITUAÇÃO, tem-se 5 opções: “MUITO-RUIM”, “RUIM”, “MÉDIO”, “BOM” e “MUITO-BOM”. Após determinada a regra escolhida, deve-se confirmar tal opção em “Add rule” e a regra é adicionada ao controlador.

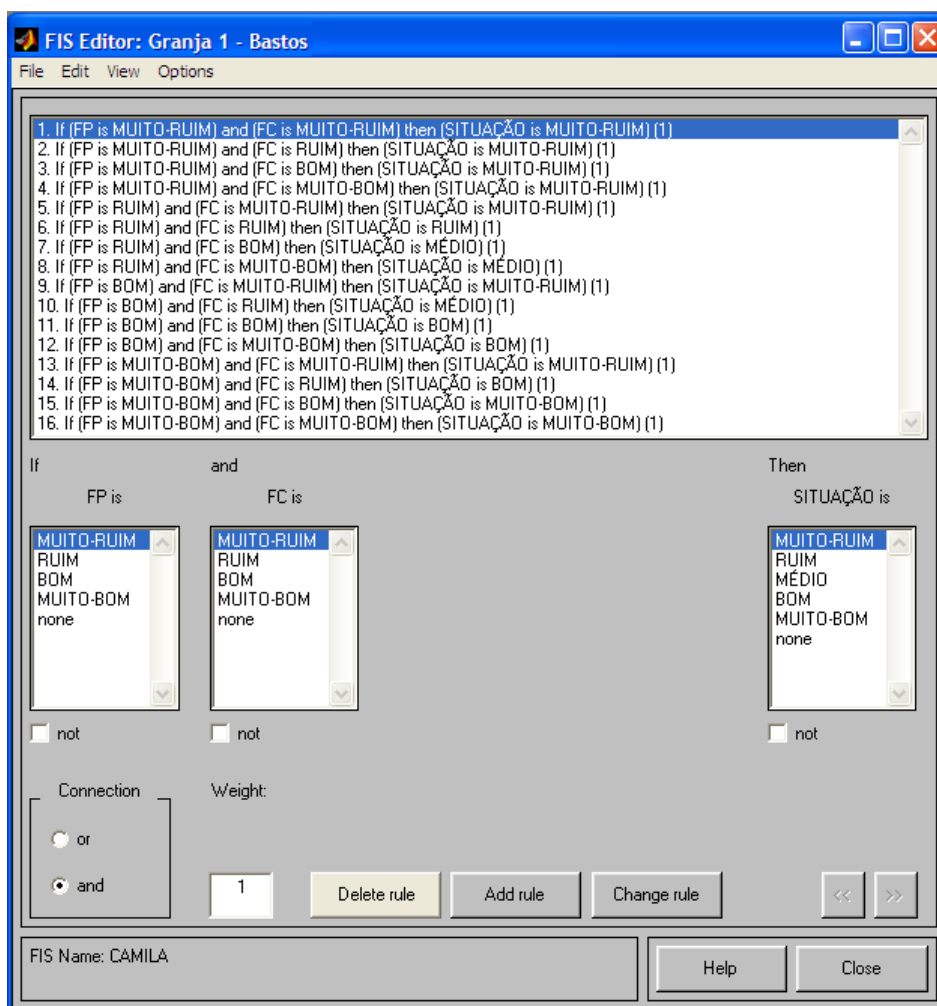


Figura 12 - Editor de regras do *software* Matlab.

4 CONCLUSÕES

O presente trabalho possibilitou a implementação de um método computacional capaz de interpretar os fatores de carga e potência e realizar uma avaliação energética de qualquer empresa do país, o que somente era realizado por especialistas da área energética. Tal método, capaz de imitar parte do raciocínio humano, foi baseado na lógica *fuzzy*.

Assim, a necessidade do auxílio de técnicos e especialistas da área de energia elétrica é somente utilizada uma única vez. Desta forma, cria-se a base de regras, composta por todas as informações extraí-

das do raciocínio humano que será sempre utilizada pela máquina (software) para interpretação de quaisquer informações dadas pela empresa sobre fatores de potência e carga.

A construção realizada do controlador *fuzzy* e sua implementação em software possibilitaram seu uso em qualquer empresa, bastando a aquisição de parâmetros elétricos de alguns meses em estudo e visita técnica de especialista da área para determinação dos parâmetros qualitativos dos fatores de potência e carga e suas conseqüências para a situação energética da empresa.

4 REFERÊNCIAS

COMPANHIA ENERGÉTICA DE SÃO PAULO. **Estrutura tarifária horo-sazonal**. São Paulo, 1990. 17 p.

PEREIRA, D. F.; BIGHI, C. A.; GABRIEL FILHO, L. R.; CREMASCO, C. P. **Sistema *fuzzy* para estimativa do bem-estar de matrizes pesadas**. Engenharia Agrícola. 2008, vol. 28, n.4, pp. 624-633.

RIBACIONKA, F. **Sistemas computacionais baseados em lógica *fuzzy***. 1999. 115 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica – Área de Concentração: Engenharia da Computação) – Universidade Mackenzie, São Paulo, SP, 1999.

RODRIGUES, F. F. C.; BORGES, C. L. T.; FALCÃO, D. M. **Programação da contratação de energia considerando geração distribuída e incertezas na previsão de demanda**. Sba Controle & Automação. 2007, vol. 18, n.3, pp. 361-371.

VIEIRA, J. P. A.; NUNES, M. V. A.; BEZERRA, U. H.; NASCIMENTO, A. C. do; BARRA

JÚNIOR, W. **Controladores *fuzzy* aplicados ao conversor de geradores de indução duplamente excitados em sistemas eólicos integrados a sistemas de potência.** Sba Controle & Automação. 2007, vol.18, n.1, pp. 115-126.

ZADEH, L. A. ***Fuzzy Sets*.** Information and Control. 1965, vol. 8, pp. 338-353.