

APLICAÇÃO PRÁTICA DA LÓGICA “FUZZY” NA DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DE PROCESSO DE UM FORNO DE TEMPERA CONTÍNUA¹

José Barbosa Junior²
Fuad Kassab Junior³

Resumo

A teoria “fuzzy” possibilita fazer a modelagem e manipular matematicamente informações vagas e imprecisas, naturais da linguagem humana e, portanto, as fornecidas pelos chamados especialistas (técnicos, operadores e práticos) ao caracterizar os processos industriais. É uma alternativa ao método clássico de modelagem matemática que utiliza basicamente as equações diferenciais. Este trabalho apresenta uma alternativa na determinação dos parâmetros de operação de fornos industriais de tratamento térmico (têmpera) por meio de um sistema “fuzzy” também chamado por sistema nebuloso. O conhecimento dos especialistas foi levantado por meio de relatórios estatísticos, que permitiram determinar o universo de discurso, os conjuntos “fuzzy” e a base de regras “fuzzy”. Obteve-se uma grande aderência do modelo “fuzzy” com o sistema real, com um erro abaixo dos 3%. Como resultado operacional obteve-se, em média, um aumento de velocidade de processo de cerca de 13%, sem alterar a qualidade do produto.

Palavras-chave: Teoria “Fuzzy”; Lógica “Fuzzy”. Lógica nebulosa.

PRACTICAL APPLICATION OF LOGICAL FUZZY IN THE DETERMINATION OF THE PARAMETERS FROM PROCESS OF ONE OVEN OF TEMPERS CONTINUUM

Abstract

The theory “fuzzy” makes possible to make the modeling and to manipulate mathematically information vague and inexact, natural of the language human being and, therefore, supplied by the specialists (operators, practical and technician) (not mathematicians) when characterizing the industrial processes. It is an alternative to the classic method of mathematical modeling that uses the differential equations basically. The present work shows an alternative to determinate the parameters of operation from industrial ovens of thermal treatments trough a “fuzzy” system. The knowledge of the specialists was made by statistics report, which allowed to determinate the universe of speech, the sets “fuzzy” and the basic “fuzzy” rules.

The “fuzzy” model with the real system was gotten with less than 3% of error. We had with the operational results, in average, the process speed proposed by “fuzzy” models was 13% higher than determinate by the Operators. For the others production orders, the quality of the product didn't have significant variance.

Key words: Fuzzy logic. Fuzzy theory.

¹ Contribuição técnica apresentada na 61º Congresso Anual da ABM, de 24 a 27 de julho de 2006, Rio de Janeiro – RJ

² Eng.º Eletricista, Mestrando em Engenharia de Sistemas – Escola Politécnica da USP; Gerente Corporativo de Produtividade da MANGELS; Professor do curso de Automação da Faculdade de Engenharia Industrial de São Bernardo do Campo.

³ Professor Pesquisador – Doutor em Engenharia de Sistemas pela Escola Politécnica da USP; Professor do curso de Pós-Graduação de Engenharia de Sistemas e Pesquisador do LAC – Laboratório de Automação e Controle da USP.

1 INTRODUÇÃO

A demanda constante por tolerâncias dimensionais e físicas mais restritas, pelo mercado consumidor de aço temperado, vem aumentando a dificuldade de se manter a repetibilidade dos processos, onde a diferença de conhecimento entre os especialistas, passa a ser um ponto de atenção para a manutenção da qualidade e produtividade.

Nas duas últimas décadas a Lógica Fuzzy vem se mostrando uma boa solução para modelagem de sistemas onde a representação fenomenológica é inviável. Os fornos de têmpera podem ser enquadrados nessa situação.

Neste trabalho mostramos que a lógica "fuzzy" é, sem dúvida, uma ferramenta que ajuda a uniformizar a operação deste tipo de equipamento. Ela permite, baseada no conhecimento do melhor especialista, uniformizar o processo de operação dos fornos, garantindo a repetibilidade, diminuição do índice de repasse e conseqüente aumento de produtividade.

Este trabalho está organizado como segue: Na seção 2 faz-se uma introdução sobre processos de têmpera e forno de têmpera. A seção 3 apresenta um breve resumo sobre a lógica "Fuzzy". A seção 4 faz menção ao ambiente computacional utilizado para o desenvolvimento do projeto e na seção 5 detalha-se o desenvolvimento da aplicação do sistema "fuzzy" ao forno de têmpera. Os resultados obtidos são apresentados na seção 6 e as conclusões na seção 7.

2 O PROCESSO METALÚRGICO

2.1 Têmpera

Têmpera é considerado, em regra, como sendo o processo de aquecimento do aço até acima da chamada zona crítica, representado na Figura 1 pela linha A3, seguido do resfriamento rápido, com uma velocidade tal que surja um aumento de dureza superficial ou total, geralmente por causa da formação de martensita.

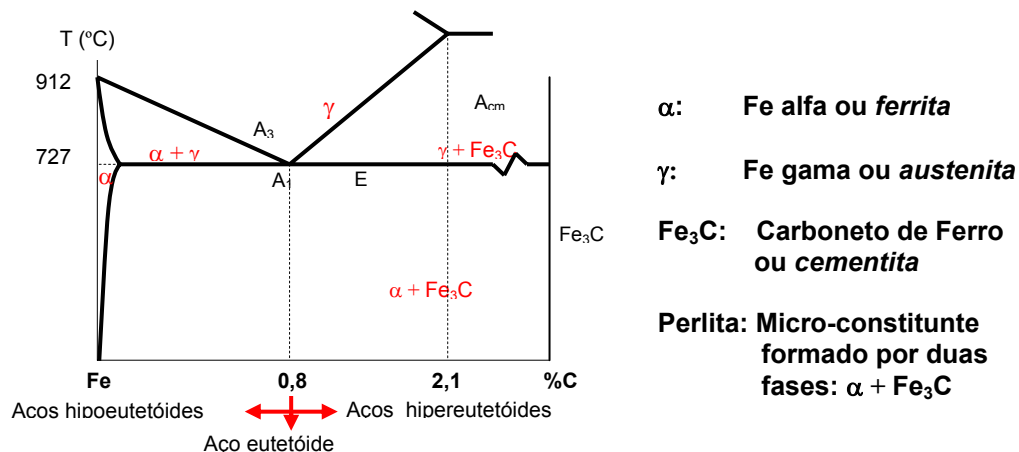


Figura 1. Diagrama de fases ferro-perlita

O meio de resfriamento pode ser a água, óleo, ar-comprimido ou outro meio que permita uma eficiente troca de calor e, portanto uma alta velocidade de resfriamento.⁽¹⁾ A Figura 2 apresenta um diagrama esquemático da curva de Transformação de Resfriamento Contínuo (TRC) onde estão representados, esquematicamente, alguns tipos de resfriamento.

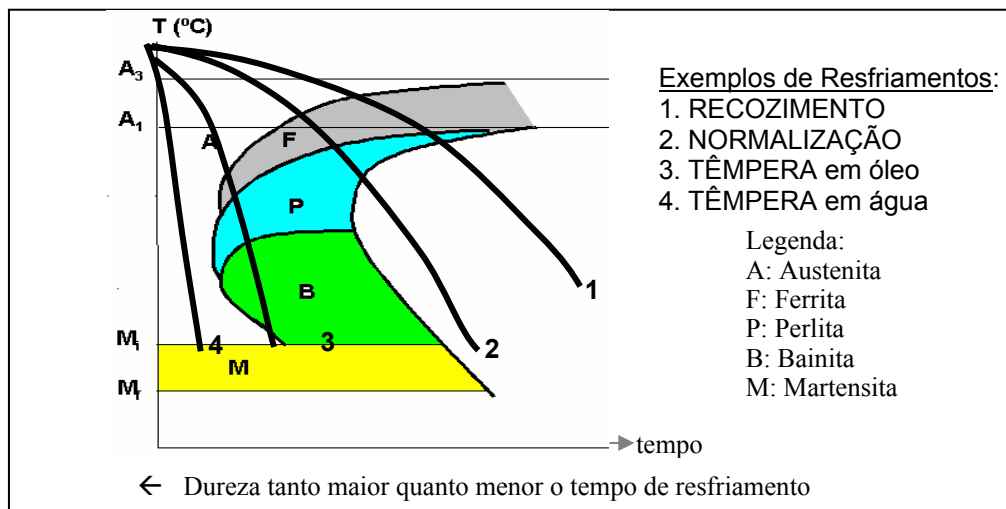


Figura 2. Curvas esquemáticas TRC e de resfriamento

Pode-se observar que, quanto mais rápido for o resfriamento, mais distante passa-se do chamado “nariz” perlítico, evitando-se assim as transformações perlíticas e bainíticas do material, obtendo-se então uma estrutura metaestável martensítica. Se cruzarmos o nariz perlítico o material ficará menos duro.

A têmpera com patamar, diminui as tensões térmicas em relação à têmpera rápida em água. Basicamente inicia-se o resfriamento rápido até passar pelo nariz perlítico quando se interrompe o resfriamento rápido antes M_1 , mantendo-se a temperatura por um certo tempo. Se passar pela região da bainita denominamos austêmpera, se for direto para a região martenzítica denominamos martêmpera.

A presença de elementos de liga no aço geralmente retarda a transformação perlítica e bainítica, afastando o nariz perlítico do eixo vertical da temperatura, facilitando desta forma a têmpera.

Os fornos industriais devem estar preparados para elevar a temperatura do aço acima do ponto de transformação A_3 e resfriá-lo na velocidade adequada sem que prejudiquem a planicidade. Em seguida deve-se revenir o aço de forma a adequar a dureza às necessidades de uso.

Em comparação a maioria dos processos industriais, este é um processo lento (velocidades menores que 10 metros/minuto) e caro, devido às elevadas temperaturas a serem atingidas e a conseqüente energia necessária.

Outras dificuldades são os aspectos construtivos de cada forno que não permitem estabelecer parâmetros que sirvam para todo e qualquer forno de têmpera, isto é, cada forno terá seu conjunto de parâmetros particular para um mesmo aço.

No forno utilizado para este experimento, é realizado o tratamento térmico de uma grande gama de aços.

Com o aumento da demanda por aços com tolerâncias restritas para dureza, limite de resistência (LR) e tamanho do grão austenítico por parte dos clientes, os operadores passaram a ser mais cautelosos na escolha dos parâmetros de trabalho, aumentando assim o tempo de processo comprometendo a produtividade.

Uma vez encontrado um conjunto de parâmetros que atende a qualidade final desejada para um determinado aço, tabela-se para uso em futuras corridas, estabelecendo uma faixa de trabalho para que o operador possa fazer o ajuste fino. Esta liberdade de ajuste pode gerar perda de produtividade, e ocorre devido à diferença da prática/conhecimento do processo por parte dos operadores.

2.2 O Forno de Têmpera

O forno, para o qual o sistema "fuzzy" foi implementado, é destinado para a têmpera contínua de aços planos, conforme esquematizado na Figura 3

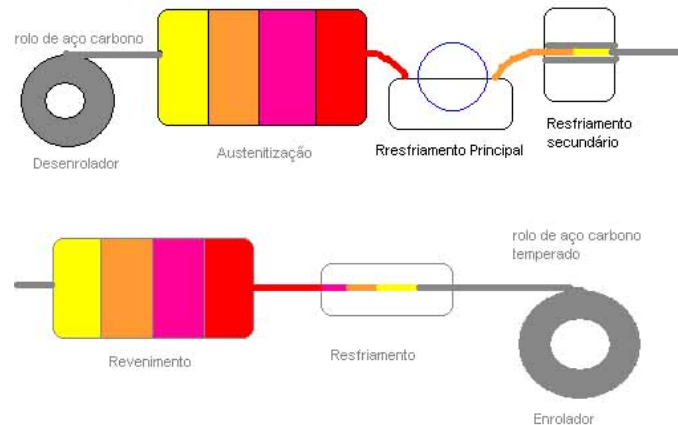


Figura 3. Esquema do Forno de Têmpera

O rolo de aço é colocado no desbobinador e a tira de aço passa pelas diversas seções acima esquematizadas. Este processo leva de 2 a 5 horas dependendo da espessura e peso do rolo. O forno tem um comprimento aproximado de 70 metros.

A temperatura é medida através de termopares instalados nas zonas de aquecimento da austenitização, resfriamento principal e secundário e nas zonas de revenimento.

As características do aço dependem, principalmente, da % de Carbono, dos elementos de liga e do grau de encruamento advindo do processo de laminação a frio.

Além do controle de temperatura das diversas partes, tem-se um controle de velocidade de passagem do material e da quantidade de gás inerte utilizado no revenimento.

3 LÓGICA "FUZZY"

Enquanto a modelagem matemática, através das equações diferenciais, é a linguagem da modelagem convencional, a heurística é a linguagem da modelagem "fuzzy".

A teoria de Conjuntos "fuzzy", desenvolvida pelo professor Lotfi Zadeh,⁽²⁾ traduz em termos matemáticos a informação imprecisa e nebulosa expressa por um conjunto de regras lingüísticas.^(3,4) Se um operador for capaz de expor sua estratégia de ação através de um conjunto de regras lógicas, um algoritmo passível de ser implementado em computador pode ser construído. O resultado é um sistema de inferência baseado em regras, para qual a lógica "fuzzy" fornece o ferramental matemático para se lidar com as tais regras lingüísticas.

Embora existam vários textos sobre a teoria "fuzzy", recomendamos Zadeh,⁽²⁾ Tanscheit,⁽⁵⁾ e Tsoukalas e Uhrig.⁽⁶⁾ Uma breve apresentação é feita neste trabalho com o objetivo de torná-lo mais didático.

3.1 Método Heurístico

O método heurístico consiste em se realizar uma tarefa de acordo com a experiência do especialista (técnicos, operadores e práticos), que utiliza de regras práticas desenvolvidas no seu dia a dia de trabalho. Uma regra heurística é uma implicação lógica da forma:⁽⁷⁾

SE <condição> ENTÃO <consequência>

Este método é similar ao método experimental de se construir uma tabela que relaciona as entradas com as saídas. Aqui começamos a utilizar o princípio da idéia da lógica fuzzy, onde as tabelas de relacionamento entre entrada e saída podem ser escritas com a utilização de números fuzzy. Em vez de relacionarmos uma entrada na forma SE <5 kg/min de aço 1080 está entrando no forno> ENTÃO <ajuste a temperatura de austenitização para 910°C>, podemos utilizar uma expressão lingüística do tipo SE <quantidade de material é GRANDE> ENTÃO <temperatura é ALTA>. GRANDE e ALTA são definidos através de funções de pertinência que descrevem a imprecisão de tais valores de entrada e saída.

O método heurístico possibilita construir uma função entre entrada-saída de forma não matemática, baseado no conhecimento do especialista que domina, de forma prática, o processo industrial.

Este método é útil sempre que o levantamento do modelo matemático exato for dispendioso, demorado ou difícil.

3.2 Conjuntos "Fuzzy"

Em Zadeh,⁽²⁻⁴⁾ propõe-se uma caracterização mais ampla, generalizando a função característica de modo que ela pudesse assumir um número infinito de valores no intervalo (0,1). Um conjunto fuzzy A em um universo de discurso X é definido por uma função de pertinência $\mu_A(x): X \rightarrow (0,1)$ e representado por um conjunto de pares ordenados:

$$A = \{\mu_A(x) / x\} \quad x \in X$$

Onde $\mu_A(x)$ indica o quanto x é compatível com o conjunto A. Um determinado elemento pode pertencer a mais de um conjunto fuzzy, com diferentes graus de pertinência.

3.3 Variáveis Lingüísticas e Funções de Pertinência

Variáveis lingüísticas são variáveis cujos valores são os nomes de conjuntos "fuzzy". No nosso caso, a temperatura é uma variável lingüística assumindo valores; baixa, média e alta. Estes valores são representados por intermédio de conjuntos "fuzzy". Sendo que x pertence a esses conjuntos com um determinado grau de pertinência, conforme mostrado na Figura 4 a seguir:

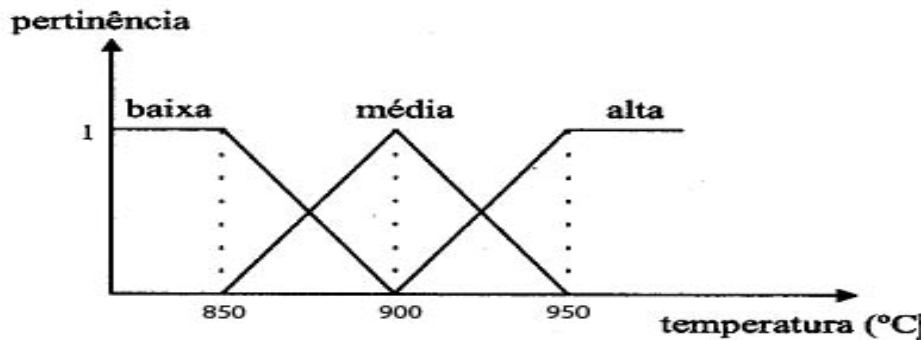


Figura 4. Conjuntos "fuzzy"

Formalmente, uma variável lingüística é caracterizada por uma quintupla $(N, T(N), X, G, M)$,⁽⁵⁾ onde:

N: nome da variável;

T(N): conjunto de termos de N, ou seja, o conjunto de nomes dos valores lingüísticos de N;

X: universo de discurso;

G: regra sintática para gerar os valores de N como uma composição de termos de T(N), conectivos lógicos, modificadores e delimitadores;

M: regra semântica, p/ associar a cada valor gerado por G um conjunto fuzzy em X;

No caso da variável temperatura da Figura 4, ter-se-ia:

N: temperatura

T(N): {baixa, média, alta}

X: 100 a 1000 °C (por exemplo)

G: temperatura não baixa e não muito alta, por exemplo

M: associa o valor acima a um conjunto fuzzy cuja função de pertinência exprime o seu significado.

3.4 “Fuzificação” de Variáveis

O processo de “fuzzyficação” de uma variável consiste na descrição da faixa de valores através de conjuntos nebulosos. O software de desenvolvimento Matlab[®] trabalha com valores normalizados 0 e 1. Existem diversos tipos de funções de pertinência,⁽⁷⁾ porém os mais comuns são: triangular, trapezoidal e gaussiana. No caso deste trabalho foram arbitrariamente utilizadas as funções triangulares e trapezoidais.

3.5 Regras de Inferência e Relações de Implicação

As regras de inferência definem o comportamento do sistema. Fazem o mapeamento entradas-saídas. As regras são do tipo:

SE <antecedentes> ENTÃO <conseqüentes>

A parte da regra que contém o SE é chamada antecedente ou premissa e a parte que contém ENTÃO é denominada conseqüente ou conclusão. A avaliação do antecedente retorna um valor na faixa de 0 a 1, enquanto o conseqüente está designando todo um conjunto.

Interpretar uma regra SE/ENTÃO envolve duas partes distintas: primeiro calcular o antecedente (que implica em “fuzificar” a entrada e aplicar as operações “fuzzy” necessárias) e, segundo, aplicando o resultado do antecedente ao conseqüente o que denominamos implicação. Existem várias relações de implicação, neste trabalho optamos pela mínimo de Mamdani.

3.6 “Defuzificação”

A saída de cada regra é um conjunto “fuzzy”, contudo deseja-se que a saída seja um único número. Para que todos os conjuntos gerem um único número de saída, inicialmente, os conjuntos de saída são agregados em um único conjunto “fuzzy” em seguida o conjunto é “defuzificado” para um único valor.

O método mais popular de “defuzificação” é o cálculo do centróide, que fornece o centro de área do conjunto agregado.⁽⁶⁾

4 AMBIENTE DE DESENVOLVIMENTO

Optou-se pelo *Fuzzy Logic Toolbox* da The Mathworks Inc, devido a interatividade oferecida por este aplicativo e disponibilidade para uso nas Universidades. Ele fornece as ferramentas para se criar e editar sistemas fuzzy de inferência na área de trabalho do Matlab®

5 APLICAÇÃO DA LÓGICA “FUZZY” PARA O FORNO DE TÊMPERA

5.1 Variáveis de entrada e saída

O primeiro passo consistiu em se determinar as variáveis de entrada e saída do processo de têmpera, e em seguida escolher as mais significativas para serem tratados pelo sistema “fuzzy”. Foram levantados as seguintes variáveis:

Entradas

- Velocidade do material;
- Temperatura de austenitização;
- Temperatura do resfriamento principal;
- Tração aplicada no material;
- Encruamento (processo de laminação);
- Composição química;
- Temperatura do revenimento;
- Seção transversal do material;
- Vazão de gás de proteção;
- Propriedades mecânicas.

Saídas

- dureza;
- estrutura;
- limite de resistência;
- planicidade.

Após uma análise empírica, realizada junto aos especialistas, sobre a contribuição de cada entrada para com as saídas, tendo como um dos principais objetivos o aumento de produtividade sem perder em qualidade, decidiu-se por iniciar a aplicação do sistema “fuzzy” no processo de austenitização, levando em conta apenas a temperatura, a largura e a espessura do material (seção transversal) como variáveis de entrada, e como variável de saída adotou-se a velocidade de passagem do material pelo forno. Evidentemente, apesar da variável de saída não ser nenhuma das mencionadas anteriormente, condicionou-se o resultado final ao atingimento da estrutura especificada. Devido a variedade de aços processada,

decidiu-se por preparar o modelo para o aço SAE 1075, eliminando a variável composição química.

5.2 Variáveis lingüísticas

A Mangels possui um extenso banco de dados relacionando todas as variáveis anteriormente citadas. Com isto foi possível selecionar o universo de discurso para todas as variáveis com boa precisão. Foram escolhidas as funções triangular e trapezoidal.

5.2.1 Entradas

- (variável lingüística) x: Temperatura da austenitização Figura 5
- (valores lingüísticos) T(x): baixa, média e alta
- (universo de discurso) U: 840 a 960 °C
- x: Seção transversal Figura 6.
- T(x): muito pequena, pequena, média, grande e muito grande
- U: 40 a 250 mm²

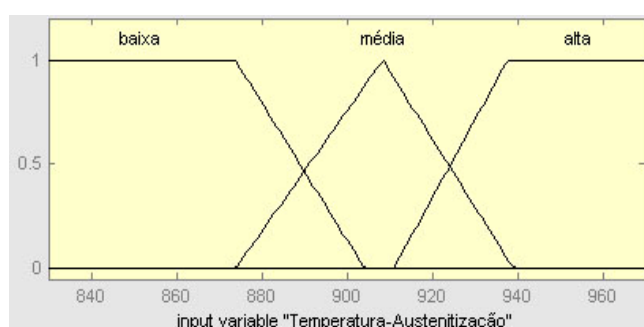


Figura 5. Temperatura de austenitização

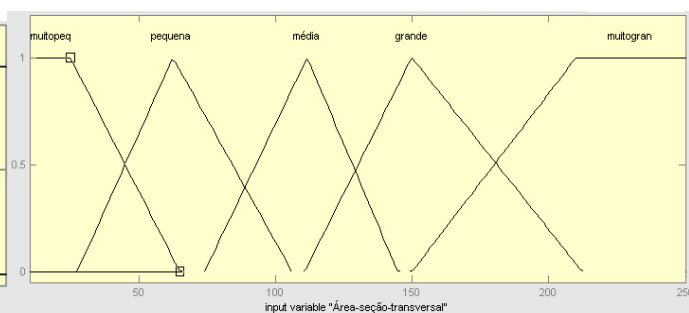


Figura 6. Seção transversal em mm²

5.2.2 Saída

- x: Velocidade Figura 7.
- T(x): muito baixa, baixa, média e alta.
- U: 2 a 6 m/min

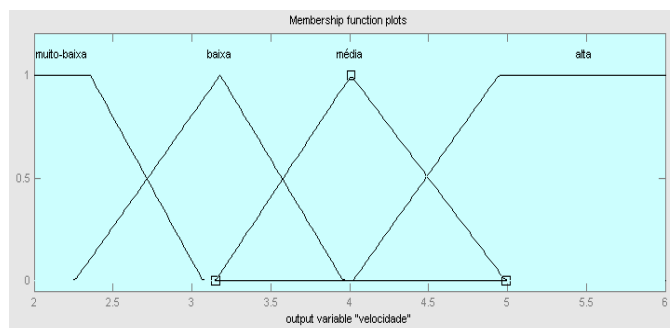


Figura 7. Velocidade em metros/min

5.3 Regras de Inferência "Fuzzy"

Com base no conhecimento do especialista e do extenso banco de dados disponível, montou-se a tabela que resume a relação entre as entradas e saídas, e que deu origem às regras "fuzzy" no formato SE/ENTÃO.

Tabela 1. Relação entre entradas e saídas

Temperatura	Seção				
	m. pequena	Pequena	Média	Grande	m. grande
Baixa	M	M	B	B	mB
Média	A	M	M	B	B
Alta	A	A	M	M	B

A velocidade, que é a variável de saída, é o resultado da combinação das variáveis de entrada, ou seja, da seção transversal e temperatura da austenitização. Os valores Fuzzy da velocidade são:

- mB – velocidade muito baixa
- B – velocidade baixa
- M – velocidade média
- A – velocidade alta

Por exemplo, fazemos a seguinte leitura do elemento (1,1) da Tabela 1; Se *<temperatura de austenitização é Baixa> E <seção transversal é muito pequena> ENTÃO <a velocidade do material deve ser Média>*.

5.4 Construção do modelo "fuzzy"

Foi experimentado o modelo nebuloso do tipo Mamdani que apresenta como característica básica o fato de tanto os antecedentes como os conseqüentes serem mapeados como conjuntos nebulosos. Como temos mais de uma variável de entrada, precisamos aplicar uma técnica de agregação dos conjuntos antecedentes, de forma a ser gerado um conjunto conseqüente. Optou-se por utilizar o operador intersecção (mínimo – ceifagem do conjunto conseqüente). Como temos várias regras, tiradas da tabela 1, teremos o mesmo número de conjuntos conseqüentes. A combinação desses conjuntos foi realizada pelo operador união (máximo).

5.5 Defuzificação

Finalmente combinaram-se os conseqüentes de cada regra e gerado um único valor de saída. Este processo é conhecido por defuzificação. Para o modelo Mamdani o mais usual é utilizarmos o cálculo do centro de área do conjunto conseqüente final, também conhecido por cálculo do centróide. A Figura 8 apresenta o resultado fornecido pelo Matlab® para o caso de termos a temperatura de austenitização igual a 890 °C e a seção transversal igual a 195 mm².

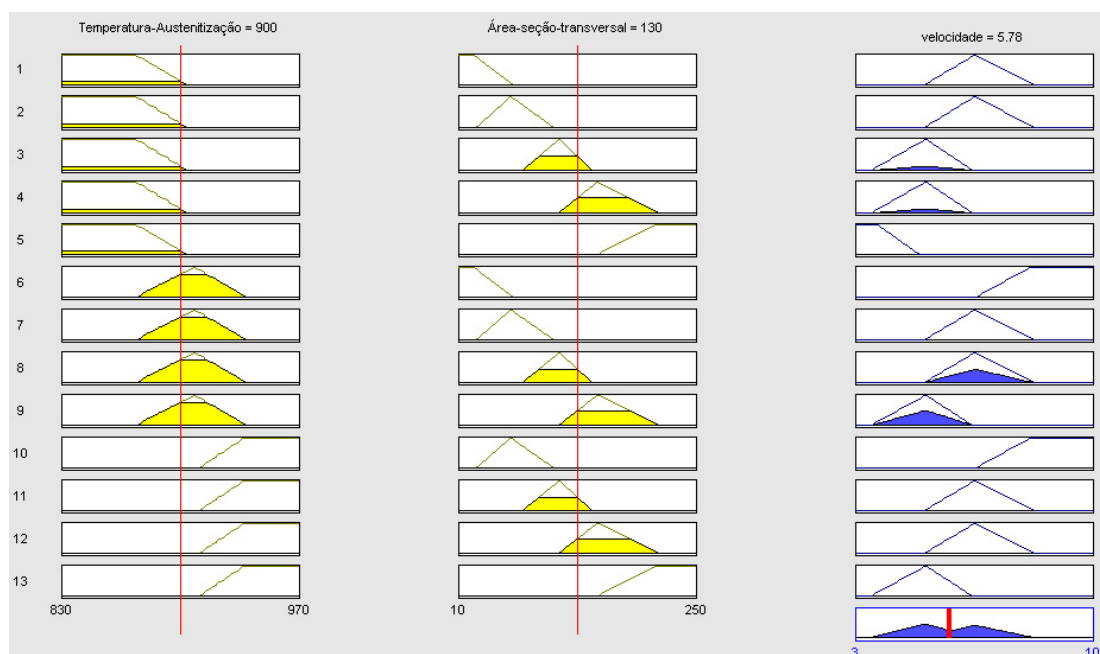


Figura 8. Resultado da aplicação das regras proposto por Mamdani

Para testarmos e ajustarmos o sistema Fuzzy, utilizamos um banco de dados disponível na empresa, que relaciona os parâmetros de ajuste do forno para diversas Ordens de Produção (OP). Escolhemos os melhores resultados, isto é, aqueles que geraram produtos com a melhor estrutura final do material.

6 RESULTADOS

Para avaliar-se o desempenho, simulou-se, com o sistema "fuzzy", diversas OPs selecionadas do banco de dados, cujo resultado está apresentado pela Figura 9. Pode-se notar que existe uma grande aderência do modelo Fuzzy com o sistema real. A diferença ficou em aproximadamente 2,8%. Após os testes comparativos com o banco de dados, realizaram-se testes "in site". Acompanhou-se 40 OPs com dois rolos cada. Propôs-se ao operador que ajustasse os parâmetros, segundo seu conhecimento/experiência, para o primeiro rolo, e com os parâmetros propostos pelo modelo "fuzzy" para o segunda rolo. Como resultado a velocidade proposta pelo modelo "fuzzy" ficou, em média, 13 % maior que a proposta pelo operador, sendo que, para todas as OPs, a qualidade do produto foi mantida, isto é, o LR a Dureza e a Estrutura.

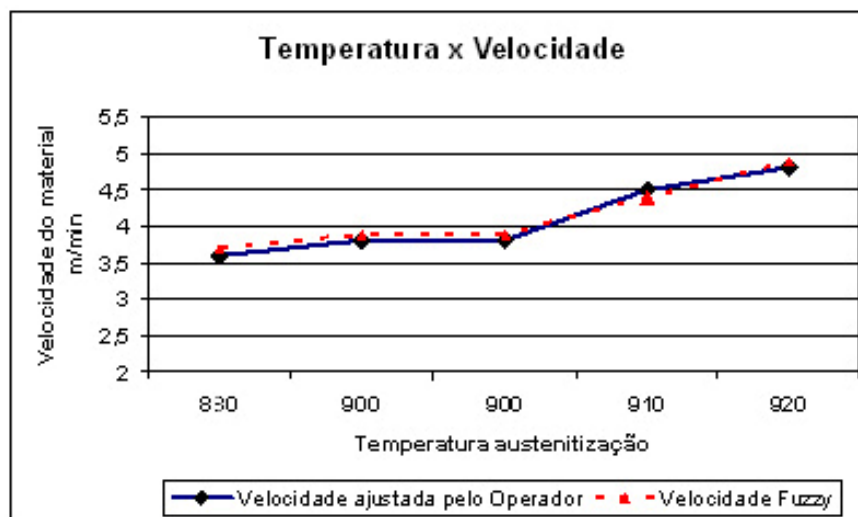


Figura 9. Comparativo entre a velocidade ajustada pelo operador x velocidade proposta pela Lógica Fuzzy

Uma possível explicação para este aumento de velocidade, não previsto, está no fato de termos utilizado o banco de dados preparado em 2000 e, atualmente, os operadores estarem mais cautelosos devido ao aumento das exigências de qualidade.

7 CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou uma alternativa na determinação dos parâmetros de operação de fornos industriais de tratamento térmico. O conhecimento dos especialistas foi levantado por meio de relatórios estatísticos que permitiram determinar o universo de discurso, os conjuntos nebulosos e a base de regras "fuzzy". Obteve-se uma grande aderência do modelo "fuzzy" com o sistema real, com um erro abaixo dos 3%. Como resultado operacional tivemos que, em média, a velocidade proposta pelo modelo "fuzzy" foi cerca de 13% maior que o ajustado pelos operadores e, para todas as ordens de produção, a qualidade do produto manteve-se a mesma.

A rapidez com que se consegue montar o modelo "fuzzy", com ajuda de softwares como o Matlab®, aliado à existência de um bom banco de dados, faz da Lógica "fuzzy" uma ótima opção para a modelagem de sistemas industriais.

Agradecimentos

Agradecemos a Mangels Ind. e Com. por ter propiciado o desenvolvimento deste trabalho disponibilizando recursos humanos e equipamentos.

REFERÊNCIAS

- 1 Silva, André Luiz da Costa e / Mei, Paulo Roberto, "Aços e Ligas Especiais" – S578a 2ª edição Editado por Eletrometal S.A. Metais Especiais, 1988.
- 2 L. A. ZADEH, "Fuzzy Sets", Information and Control, Vol. 8, pp. 338-353, 1965.
- 3 L. A. ZADEH, "Outline of a New Approach to the Analysis of Complex Systems and Decision Processes", IEEE Transactions on System, Man and Cybernetics, Vol. 3, pp. 2844, 1973.
- 4 Zadeh Lotfi A. "Fuzzy Logic = Computing with Words". IEEE Transactions on Fuzzy Systems, V 01. 4, nº 2, pp. 103-111
- 5 Tanscheit, Ricardo (2003). "Sistemas Fuzzy" DEE – PUC Rio de Janeiro, RJ, C 38.063.
- 6 Tsoukalas, Lafteri H. / Uhrig, Robert E., "Fuzzy and Neural Approaches in Engineering", Editora John Wiley & Sons, Inc – 1997.
- 7 Shaw, Ian S. / Simões, Marcelo Godoy. "Controle e Modelagem Fuzzy", Editora Edgard Blucher LTDA, 1999.

BIBLIOGRAFIA

- 1 Scherr, Leopold (1977). O que é aço – EDUSP Ed. Da Universidade de São Paulo.