JOSÉ BARBOSA JUNIOR

LÓGICA NEBULOSA (“FUZZY”) APLICADA NA DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DE TRABALHO DE FORNOS INDUSTRIAIS DE TÊMPERA CONTÍNUA PARA O AÇO CK75

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Engenharia

SÃO PAULO

2006

JOSÉ BARBOSA JUNIOR

LÓGICA NEBULOSA (“FUZZY”) APLICADA NA DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DE TRABALHO DE FORNOS INDUSTRIAIS DE TÊMPERA CONTÍNUA PARA O AÇO CK75

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Engenharia

Área de Concentração:
Engenharia de Sistemas

Orientador:
Prof. Dr. Fuad Kassab Junior

SÃO PAULO

2006

Aos meus pais

Que me deram:

A coragem para ousar,

A paciência para persistir,

O exemplo a seguir.

AGRADECIMENTOS

À minha esposa Stella, pelo indispensável apoio, paciência e compreensão.

Aos meus filhos Alexandre e Juliana, que fazem valer a pena todo e qualquer esforço.

Às minhas irmãs, pelo amor que sempre demonstraram.

Ao Professor Fuad, pela inestimável orientação e disponibilidade.

Aos colegas da Mangels, Luis Fernando Martins Maffei e João Carlos Guerrero, que me ajudaram a desvendar o mundo maravilhoso da metalurgia.

Aos colegas Professores Paulo A. Maya e Fabrízio Leonardi, por me incentivarem a percorrer esta jornada.

Ao Sr. Ronalde Silveira de Pinna, vice-presidente do Grupo Mangels, que, com sua invejável visão de futuro, acreditou neste trabalho e permitiu sua experimentação.

SUMÁRIO

Lista de tabelas
Lista de figuras
Lista de siglas
Glossário
Resumo
"Abstract"

CAPÍTULOS

1. INTRODUÇÃO

1.1. Motivação 14
1.2. Objetivo 14
1.3. Justificativas 14
1.4. Metodologia 15
1.5. Estrutura do Trabalho 16

2. MODELAGEM

2.1. Modelagem Clássica 17
2.2. Modelagem Heurística 19

3. LÓGICA "FUZZY"

3.1. Matemática "fuzzy" 22
3.2. Descrição Lingüística e Formas Analíticas 23
3.3. Inferência "fuzzy" 26
3.4. Relações de Implicação 28
3.5. Algoritmos "fuzzy" 33
3.6. "Defuzificação" 34

4. O PROCESSO DE TÊMPERA

4.1. O Ferro 37
4.2. O Aço 40
4.3. Perlita 42
4.4. Diagrama de Transformação de Fase Isotérmica TTT 43
4.5. Martensita 46
4.6. Têmpera 46
4.7. Diagrama de Transformação por Resfriamento Contínuo – TRC..... 46
4.8. Grão Austenítico 48
4.9. Ciclos de Resfriamento 49
4.10. Revenimento 51

5. O FORNO DE TÊMPERA CONTÍNUA

5.1. Finalidade do forno 53
5.2. Características construtivas 53
5.3. Operação 55

6. PROJETO

6.1. Gerador de “set-point” (GSP) 58
6.2. Sintonia 70
6.3. Resultados 73

7. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

7.1. Conclusões 75
7.2. Sugestões para futuros trabalhos 76

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 77

APÊNDICE

1. Conjuntos “fuzzy” 81
2. Operações com Conjuntos “fuzzy” 87
3. Propriedades 91
4. Princípio da Extenção 92
5. α-Corte 94
6. Relações “fuzzy” 95

LISTA DE TABELAS

		Pág.
1 -	Alguns operadores de implicação “fuzzy” [Tsoukalas & Uhrig – 97]	29
2 -	Representação da relação $R_{A \bullet B}$	31
3 -	Interpretação para o conectivo TAMBÉM em função do operador de implicação ($\vee$ → união e $\wedge$ → intersecção)	33
4 -	Transformação de fase do ferro em relação a temperatura	37
5 -	Relação de regras “fuzzy”	68
6 -	Forma alternativa de representação das regras “fuzzy”.....	68
7 -	Comparação da velocidade levantada do banco de dados com a fornecida pelo modelo "fuzzy" descrito no item 6.1.	68
A1 -	Operações e definições utilizadas com conjuntos “fuzzy”	89
A2 -	Relação entre teoria de conjuntos clássica e “fuzzy”	91

LISTA DE FIGURAS

		Pág.
2.1 -	Relação entre a complexidade e a precisão do modelo [Ross – 95].....	20
3.1a -	Gráfico do antecedente A da regra de inferência (premissa 1 do GMP)	30
3.1b -	Gráfico do conseqüente B da regra de inferência (premissa 1 do GMP).....	30
3.1c -	Gráfico do conjunto (“singleton”) de entrada A’ (premissa 2 do GMP).....	30
3.2 -	Conjunto "fuzzy" B’ resultante da descrição lingüística do exemplo apresentado pelas Figuras (3.1a) a (3.1c) (conseqüência do GMP)	32
3.3 -	Algoritmo "fuzzy" utilizando o mínimo de Mamdani	34
4.1 -	Estrutura cúbica de corpo centrada (CCC); (a) representação esquemática, (b) vista tridimensional, (c) célula unitária e (d) plano diagonal da célula unitária. Referência [Silva & Mei – 88]	38
4.2 -	Estrutura cúbica de face centrada (CFC) ; (a) representação esquemática, (b) vista tridimensional, (c) célula unitária e (d) plano da face da célula unitária. Referência [Silva & Mei – 88]	38
4.3 -	Diagrama de fase ferro-cementita [Kolososki – 04].....	41
4.4 -	Diagrama de fases ferro-cementita com indicação da respectiva estrutura [Kolososki – 04]	42
4.5 -	Mudanças de fases durante o resfriamento de uma liga FeC (0,25%C) [Silva & Mei – 88]	43
4.6 -	Redução da fração volumétrica da ferrita com o aumento da taxa de resfriamento (^{o}C/min.) [Silva & Mei – 88]	44
4.7 -	Curva TTT esquemática [Scheer – 77]	45
4.8 -	Curva TTT aço SAE1080 com 0,79% C, 0,76% Mn. [ASM – 77] ….....	45
4.9 -	Superposição dos diagramas de transformação isotérmica e transformação por resfriamento contínuo para o aço eutetóide. [Callister – 02].....	46
4.10 -	Curva TTT aço SAE1070 com 0,76% C, 0,29% Mn com as linhas de resfriamento e respectivas durezas em HV representadas [Atlas – XX]	48
4.11 -	Tamanho do grão austenítico pela ASTM (a) escala de conversão do número de grão ASTM em diâmetro médio equivalente (b) (figura fora de escala) [Silva & Mei – 88]	49
4.12 -	Ciclo de revenimento para a martêmpera, levando em conta a espessura da peça [Silva & Mei – 88]	50
4.13 -	Ciclo de revenimento para a austêmpera, levando em conta a espessura da peça [Silva & Mei – 88]	51
4.14 -	Ciclo de revenimento para uma têmpera convencional, levando em conta a espessura da peça. [Silva & Mei – 88]	52
5.1.a -	Esquema do forno de têmpera contínua (continua na Figura 5.1.b)	57
5.1.b -	Esquema do forno de têmpera contínua (continuação da Figura 5.1.a)	57

6.1 - Representação esquemática do GSP 58

6.3 - Mapeamento do sinal de entrada seção - transversal 66

6.4 - Mapeamento do sinal de entrada temperatura de - austenitização 67

6.5 - Mapeamento do sinal de saída - velocidade 67

6.6 - Resultado da inferência e "defuzificação" para $T_{austenitização}$=892 ºC e S=140 mm^2 70

6.7 - Comparação entre as velocidades obtidas do banco de dados e as da simulação "fuzzy" em relação a seção transversal 72

6.8 - Gráfico da superfície formada pelas duas variáveis de entrada e pela variável de saída 72

6.9 - Comparação entre as velocidades determinadas pelos operadores e as sugeridas pelo GSP em relação a seção transversal 73

A.1 - Representação dos conjuntos de temperaturas alta, média e baixa pela teoria clássica 82

A.2 - Representação dos conjuntos de temperaturas alta, média e baixa pela teoria dos conjuntos "fuzzy" 83

A.3 - Caracterização das partes de um conjunto "fuzzy" 84

A.4 - Função triangular 86

A.5 - Sistema convencional 92

A.6 - Exemplo de um α – corte 95

LISTA DE SIGLAS

$\equiv$	- por definição
$R_1 \circ R_2$	- composição máx-mín
$\dot{x}(t)$	- vetor das derivadas dos estados da planta.
$\subset$	- contido em
$\cup$	- intersecção
$\vee$	- operador máx. (máximo)
$\wedge$	- operador mín. (mínimo)
ϕ	- operadores de implicação "fuzzy"
$\cap$	- união
$\mu(x)$	- função de pertinência "fuzzy"
(A,B,C, D)	- representação de estados da planta (pag. 17). Ou conjuntos "fuzzy"
$R(x,y)$	- relação de implicação "fuzzy"
s	- variável independente no domínio das freqüências complexas.
t	- variável independente no domínio do tempo.
$u(t)$	- vetor de entradas da planta
$u(t)$	- vetor de entradas da planta.
$\mathrm{x}(t)$	- vetor de estados da planta.

GLOSSÁRIO

CCC	- cúbico de corpo centrado
CFC	- cúbico de face centrada
CK75	- aço com 0,75% de carbono
Coil-set	- empenamento no sentido longitudinal de uma tira de aço
crisp	- representa um par de números {0,1}.
fuzzy	- nebuloso, difuso, subjetivo, vago, incerto, inexato
GMP	- Modus Ponens Generalizado
GSP	- gerador de set-point
MISO	- “multiple input single output”
NTM	- norma técnica Mangels
OP	- ordem de produção
Set-point	- valor de referência
Singleton	- denomina uma função "fuzzy" com valor unitário
SISO	- “single input single output”
Tenacidade	- Uma propriedade de um material capaz de absorver energia através de deformação plástica; intermediário entre suavidade e fragilidade.
TRC	- diagrama de transformação por resfriamento contínuo
TTT	- temperatura, tempo e transformação.

RESUMO

Este trabalho apresenta o projeto de um sistema gerador de “set-point” (GSP), utilizado na determinação dos parâmetros de trabalho de fornos industriais de têmpera contínua de aços ao carbono, cuja modelagem é baseada na lógica "fuzzy". O trabalho é constituído de três etapas básicas: primeiro, estudou-se os princípios metalúrgicos do aço e do processo de têmpera, necessários para o entendimento do problema, tendo como foco no aço CK75 de grande aplicação industrial. Segundo, estudou-se a funcionalidade de todas as partes constituintes do forno e seu modo de operação. Na terceira etapa, baseado em entrevistas com os operadores e técnicos em metalurgia, considerados especialistas no processo de têmpera, realizou-se a modelagem "fuzzy". Constatou-se de que forma as partes do forno afetam a transformação do aço, as variáveis de entrada e saída relevantes para o GSP e finalmente realizou-se o GSP com o MATLAB®. O modelo foi exaustivamente testado na produção de aço temperado, em um dos fornos da empresa Mangels, o que possibilitou sua validação de forma incontestável.

Palavras-chave: lógica “fuzzy”, lógica nebulosa, têmpera contínua.

ABSTRACT

This work presents the project of a generating system of "set-point" (GSP), used in the determination of the parameters of work of a process of continuous tempering of carbon steels, whose modeling is based on the "fuzzy" logic. The work is made of three basic stages. First of all the principles of metallurgy for the steel and temper process, which are necessary for the understanding of the problem are studied. It is focused in the steel CK75 of great industrial application. In the second stage, the functionality of all parts of the furnace and its operation way is studied. In the last stage a "fuzzy" modeling is accomplished, based on interviews with the operators and technicians in metallurgy, who are considered specialists in the temper process. It is identified how the parts of the oven affect the transformation of the steel, variable input and output relevant to GSP. Finally will use the GSP with MATLAB® is carried out. The model was tested in exhaustive way in one of the furnace of the company Mangels what made its incontrovertible validation possible.

Keywords: Fuzzy logic, continuous tempering.