

# Controle Multivariado no Processo de Tratamento Térmico de Petróleo Utilizando Lógica *Fuzzy*

Fabício Melo<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Faculdade Estácio de Sergipe (FASE)  
Rua Teixeira de Freitas, 10, Salgado Filho – Aracaju/SE

fs-melo@bol.com.br

**Abstract.** *This paper presents an exploratory / descriptive study about the application of fuzzy logic in promoting multivariate control heat treatment oil process, proposing a fuzzy expert system as an alternative to traditional SCADA systems operated by human experts. The variables that influence the quality of treated oil and their interrelations were drawn. From this a fuzzy system has been modeled demonstrating also that the symbolic representation of fuzzy knowledge can improve control and increase the level of automation and process quality in question.*

**Resumo.** *Este trabalho apresenta um estudo exploratório/descritivo a cerca da aplicação da lógica fuzzy na promoção do controle multivariado do processo de tratamento térmico de petróleo propondo um sistema especialista nebuloso em alternativa aos tradicionais sistemas supervisórios operados por especialistas humanos. Foram traçadas as variáveis capazes de influenciar a qualidade do petróleo tratado bem como suas inter-relações. A partir disso foi modelado um sistema nebuloso demonstrando-se ainda que a representação simbólica do conhecimento fuzzy pode melhorar o controle e aumentar o nível de automação e qualidade do processo em questão.*

## 1. Introdução

O petróleo em sua forma *in natura* é produzido associado ao gás e água. Com isso é necessário um processo para separar o óleo, do gás e da água através de plantas de processamento primário. Nesse caso o petróleo é recebido dos campos de produção e sofre uma separação de fases líquido-gás, por meio de vasos separadores, para então seguir para o tratamento da fase líquida para remover a água, que está presente de forma emulsionada e/ou livre, bem como seus contaminantes dissolvidos, como sais inorgânicos e sedimentos. Para o tratamento após a remoção do gás associado é utilizado um equipamento chamado tratador térmico [Thomas 2004; Speight 2002; Manning and Thompson 1995], o qual é responsável pela remoção da água emulsionada e seus sais especificando o produto para entrega as refinarias sem ultrapassar os limites estabelecidos pela Agência Nacional do Petróleo (ANP); no máximo 1% de BSW (*Basic Sediments and Water* - teor de água e sedimentos) e 570 mg/l de NaCl como índice de salinidade total (IST) [Frinhani *et al* 2007].

A presença da água, dos sais inorgânicos e dos sedimentos dissolvidos no petróleo são apontados na literatura como grandes responsáveis por diversos problemas em equipamentos e tubulações, tais como corrosão, entupimento e incrustação, desde a produção até as plantas de processamento das refinarias. Sendo assim, o controle dos

índices de BSW e IST ainda na fase do processamento primário do petróleo cru, no tratador térmico, constituem-se de grande importância para minimizar os danos causados [Frinhani *et al* 2007; Gauto and Rosa 2013; Morigaki 2010].

Para controlar as variáveis do processo no tratador tradicionalmente utiliza-se sistemas supervisórios que implementam estruturas de controle Proporcional, Integral e Derivativo (PID) para atuar em válvulas que ajustam o fluxo de entrada e de saída dos fluidos no equipamento e regulam a quantidade de combustível queimado para fornecer calor ao petróleo em tratamento com base em valores estabelecidos e inseridos por especialistas humanos. No entanto, esse método, apesar de apresentar algum nível de automação preservando as pessoas que atuam manualmente e estariam expostas aos riscos do processo, ainda requer a atuação e supervisão de um especialista treinado em tempo integral, enquanto a planta estiver em operação, geralmente 24 horas por dia, para visualizar, interpretar e estabelecer os valores requeridos das variáveis de controle.

O objetivo deste trabalho é propor um novo modelo de sistema de controle utilizando a lógica *fuzzy* para aumentar o nível de automação do processo.

## 2. Controle tradicional do Processo

A maneira tradicional para controlar um processo consiste em medir cada variável controlada, compará-la com o valor desejado (*set point* - SP) e alimentar a diferença (o erro) de cada uma delas em um controlador que vai alterar uma variável manipulada (MV) para dirigir a variável controlada de volta para o valor desejado. A informação é, portanto, "realimentada" da variável controlada para uma variável manipulada, como esboçado na Figura 1 [Luyben 1996].

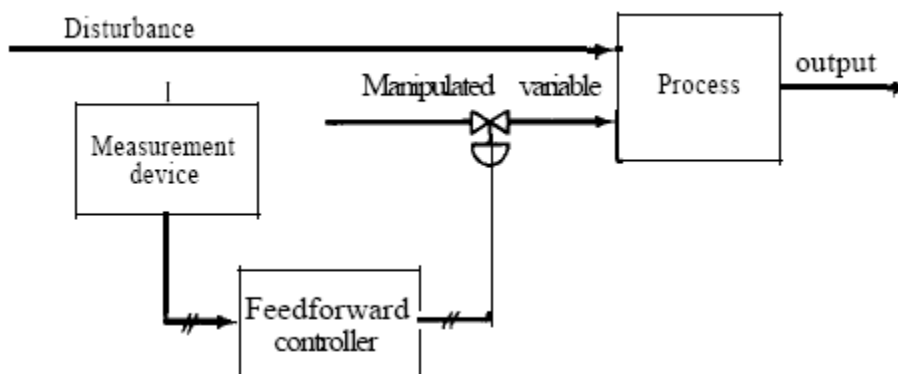


Figura 1. Controlador realimentado [Luyben 1996].

No caso de um controlador do tipo PID o sinal de controle, segundo Ogata (1985), pode ser dado pela expressão:

$$u = K_p e_s(t) + K_i \int e_s(t) dt + K_d \left[ \frac{de_s(t)}{dt} \right]$$

onde:

$u$  - sinal de controle

$K_p$  - constante proporcional

$e_s$  - sinal de erro, diferença do valor medido da variável controlada pelo seu *set point*, no instante de tempo  $t$ .

$t$  - tempo

$K_i$  - constante de integração

$K_d$  - constante de derivação

### 3. Controle *fuzzy*

Um sistema de controle *fuzzy* é um sistema especialista baseado em regras cujas variáveis ou parte delas são variáveis linguísticas, as quais representam dados imprecisos como pequeno, grande, médio. A essência desse tipo de lógica é retornar um resultado sem a necessidade de entradas precisas utilizando-se de linguagem natural e raciocínio aproximado fazendo com que as tomadas de decisão aproximem-se cada vez mais das decisões humanas quando, na resolução de um problema complexo, os especialistas humanos buscam estruturar em conceitos gerais o conhecimento sobre o problema e depois observam as relações essenciais entre esses conceitos [Rezende 2005; Weber and Klein 2003].

De forma simplificada, em sua estrutura geral, um sistema *fuzzy* é composto por três partes básicas: a unidade de fuzificação, no terminal de entrada, o motor de inferência, construído por uma base de regras de controle de lógica *fuzzy* no núcleo, e a unidade de defuzificação no terminal de saída, como mostrado Figura 2.

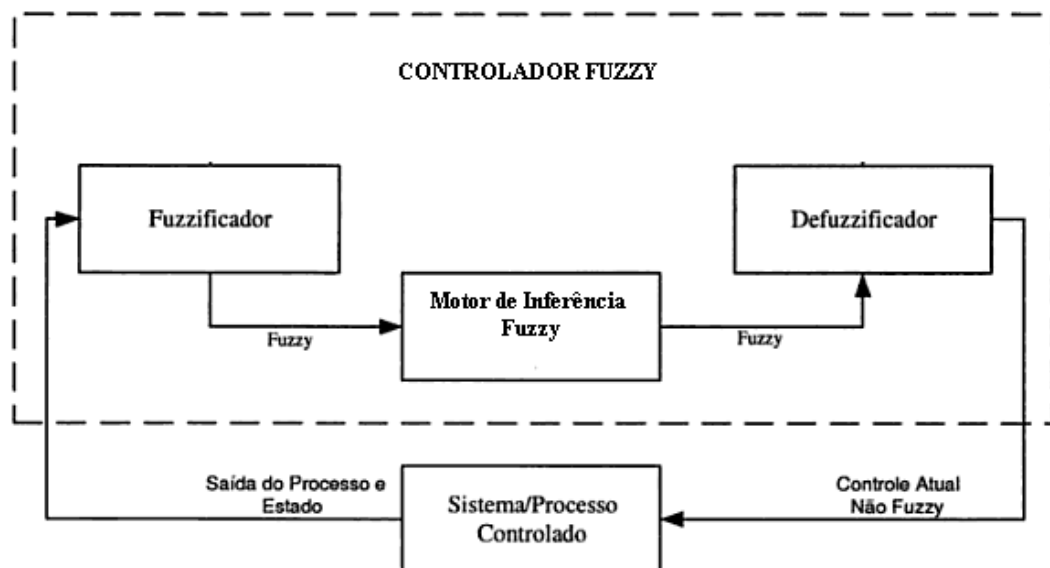
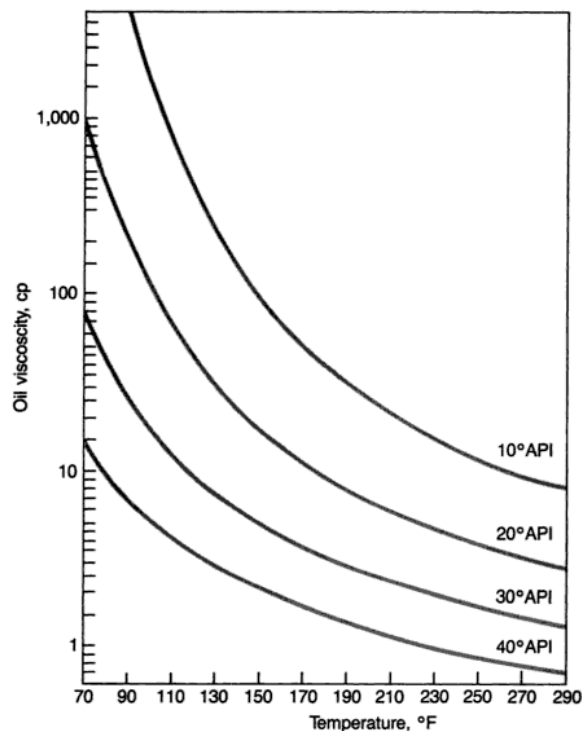


Figura 2. Estrutura Geral de um Controlador Lógico Fuzzy, Adaptada de Chen e Pham, 2001.

#### 4. O tratamento térmico de emulsões de petróleo

Com base na análise realizada por McKetta (1992) a cerca dos resultados apresentados por Beggs e Robinson (1975) sobre ensaios realizados com 460 tipos de petróleo cru, foi verificado que a viscosidade do fluido em tratamento é influenciada fortemente pela temperatura e por sua densidade, já que essa é inversamente proporcional ao grau API ( $^{\circ}API$ ), o qual poderá ser calculado pela equação abaixo. Ver Figura 3.

$$\text{Onde } ^{\circ}API = \frac{141,5}{d_{\text{óleo}}} - 131,5.$$



**Figura 3. Gráfico de correlação da viscosidade com a temperatura [McKetta 1992]**

Segundo Garcia (2005) a temperatura no interior de um equipamento permutador de calor poderá ser afetada pela vazão de entrada do fluido no processo. Já McKetta (1992) afirma que o óleo deve ser mantido à temperatura por um período específico de tempo para quebrar a emulsão, o que chamaremos de tempo de permanência, que é dado pela razão entre o volume do equipamento e a vazão de entrada do fluido (dada em unidade de volume / unidade de tempo).

O índice de BSW no fluxo de saída de óleo tratado é o maior indicador de qualidade no processo em estudo, constituindo, assim, a variável objetivo a ser otimizada. Por sua vez esse indicador pode ser afetado principalmente pela taxa de vazão, pela densidade e pela temperatura de tratamento da emulsão.

## 5. Metodologia

Para o desenvolvimento do modelo de controle proposto foi utilizada a metodologia de projeto de sistemas nebulosos, descrita por Cox (1994) e sintetizada por Galvão (1999), na construção de um controlador *fuzzy* do tipo Mamdani. No primeiro momento o processo de tratamento térmico do petróleo foi modelado determinando-se os fluxos de entrada e saída do sistema produtivo. Em seguida procedeu-se os seguintes passos:

- Seleção das possíveis variáveis do processo (controladas e manipuladas);
- Definição das faixas numéricas de variação e dos conjuntos *fuzzy* associados;
- Análise das relações entre as variáveis de entrada e de saída e construção de algumas regras;
- Definição das funções de pertinência de cada variável;
- Modelagem e simulação do controle com *Fuzzy Logic Toolbox*, do Scilab.

A modelagem dos fluxos de entrada e saída foi efetuada a partir da observação do tratador térmico horizontal descrito por McKetta (1992), conforme Figura 4.

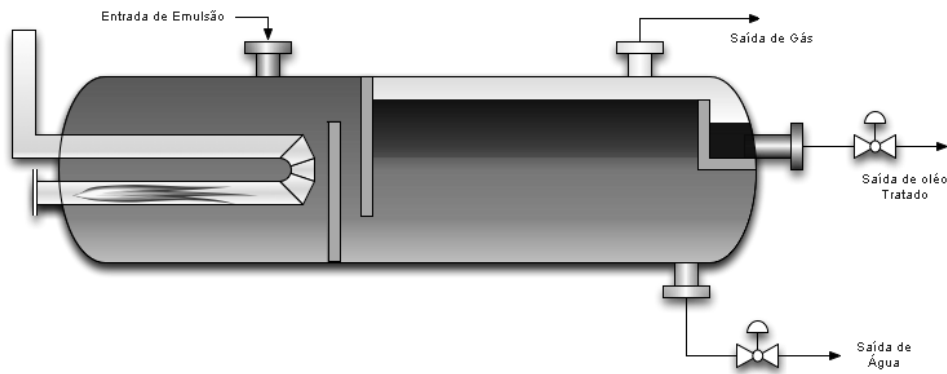


Figura 4. Tratador Térmico [ McKetta 1992]

## 5. Resultados e discussões

### 5.1. Seleção das principais variáveis do processo.

No fluxo de entrada de emulsão do equipamento foram identificadas as variáveis significativas responsáveis por influenciar de alguma forma os resultados desejados de BSW e algumas unidades de medida que podem ser usadas.

As variáveis de entrada mapeadas nesse estudo são dadas por:

$V_z$ : vazão de entrada no tratador ( $m^3/d$ );

$T$ : temperatura de tratamento da emulsão ( $^{\circ}C$ );

$d$ : densidade do fluido de entrada ( $g/cm^3$ ).

No fluxo de saída foi identificada a variável de interesse maior para controlar as buscas por otimização, o índice de BSW, dado em porcentagem (%) em volume de água livre e sedimentos pelo volume total do fluido de saída.

A Tabela 1 apresenta as variáveis linguísticas selecionadas e suas faixas de variação dentro do contexto do processo.

Tabela 1 - Variáveis Linguísticas do Processo e suas Variações

Variáveis Linguísticas	Faixas de variação		
	Vazão(m <sup>3</sup> /dia)	Densidade(g/cm <sup>3</sup> )	Temperatura(°C)
baixo	0-550	0,3-0,6	30-65
médio(a)	500-850	0,5-0,8	55-85
alto	800-1100	0,7-1,0	75-100
muito_alto	1050-1500	0,9-1,5	###

## 5.2. Funções de pertinência

As Figuras 5 e 6 demonstram a modelagem dos conjuntos nebulosos de entrada “vazão” e “densidade” que delimitam os conceitos linguísticos em um universo de discurso de 0 à 1500 m<sup>3</sup>/dia de vazão e de 0,3 à 1,2 g/cm<sup>3</sup> de densidade e seus respectivos graus de pertinência representados por funções trapezoidais.

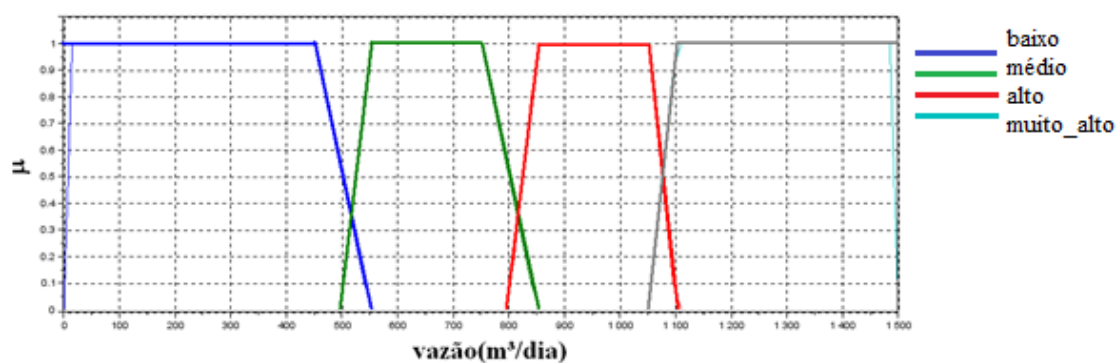
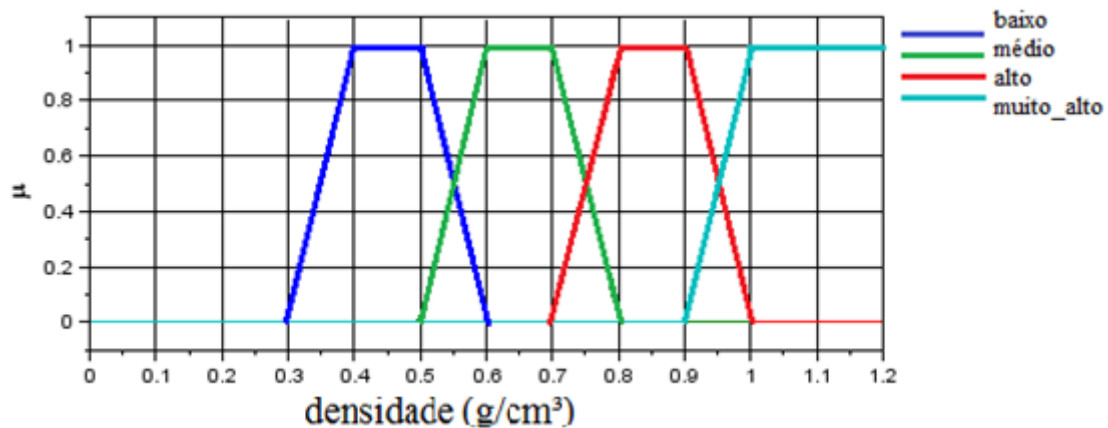
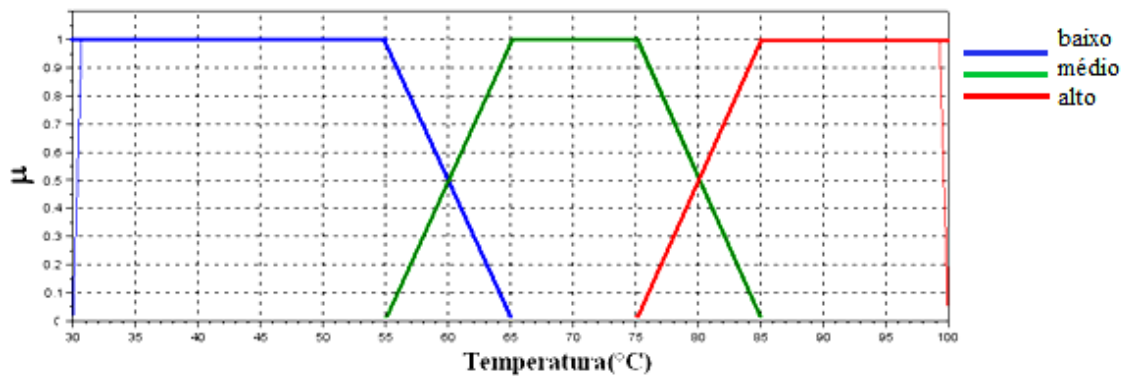


Figura 5. Função de pertinência da variável linguística vazão



**Figura 6. Função de pertinência da variável linguística densidade**

A Figura 7 demonstra o conjunto nebuloso de saída “temperatura” delimitando os conceitos linguísticos em um universo de discurso de 30 à 100 °C de temperatura e seus respectivos graus de pertinência representados também por funções trapezoidais.



**Figura 7. Função de pertinência da variável linguística temperatura**

É importante notar que essas funções de pertinência representam o grau de compatibilidade de entrada adquirida no monitoramento do processo e representam a probabilidade desta entrada ser classificada em dada categoria, conceito linguístico. Na verdade, o grau de adesão representa a possibilidade de que a entrada pertence ao conjunto.

### 5.3. Regras fuzzy

Com base nas considerações de Garcia (2005) e na interpretação do gráfico de correlação de McKetta (1992), algumas interações entre as variáveis do sistema foram abstraídas e são suficientes para a construção de uma base de regras de inferência fuzzy apresentada adiante.

```
R1: IF {densidade IS alta} THEN {Temperatura IS alta}
R2: IF {densidade IS muito_alta} THEN {Temperatura IS alta}
R3: IF {vazão IS media} AND {densidade IS media} THEN {Temperatura IS media}
R4: IF {vazão IS alta} THEN {Temperatura IS alta}
R5: IF {vazão IS muito_alta} THEN {Temperatura IS alta}
```

### 5.4. Modelagem do sistema nebuloso

A Figura 8 mostra um esboço do modelo *fuzzy* construído com base no método de Mandani. Esse modelo tem duas variáveis de entrada ( $d$  e  $V_z$ ) e uma de saída ( $T$ ). Os retângulos azuis representam os módulos de um sistema *fuzzy* a serem implementados em camada de software. Esse deve receber em tempo real as condições de vazão e densidade do fluido em tratamento enviadas através de sensores e enviar a um atuador a temperatura adequada para aquecimento da emulsão.

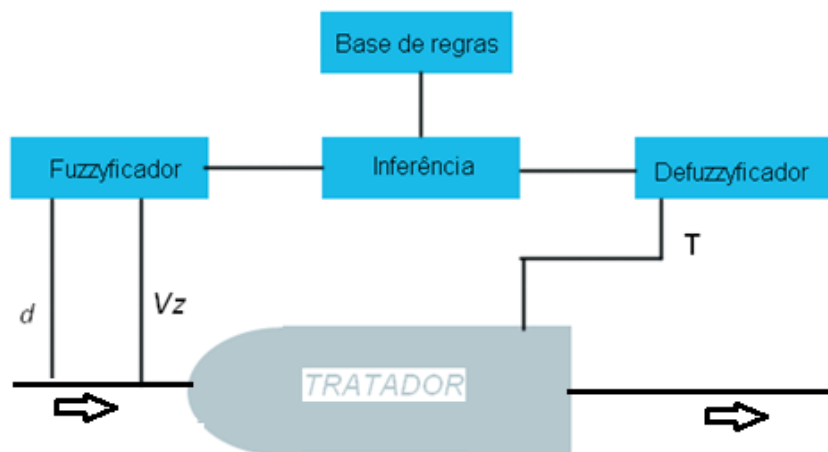


Figura 8 - Arquitertura do sitema *fuzzy* proposto

### 6. Conclusão

O sistema de inferência *fuzzy* modelado é capaz de abstrair a dinâmica do processo e determinar recomendações similares àquelas efetuadas por especialistas, como manter temperatura alta, manter temperatura baixa, e outras, e, com isso, fornecer comandos a um dispositivo atuador para ajustar a temperatura de tratamento reestabelcendo o equilíbrio desejado. Dessa forma o trabalho apresentado demonstra que a representação simbólica do conhecimento provida pela lógica *fuzzy* pode melhorar o controle e aumentar o nível de automação e qualidade do processo em questão, pois traz uma alternativa aos tradicionais sistemas supervisórios operados por especialistas humanos.

As observações obtidas a partir deste estudo sugere a necessidade de pesquisas futuras a fim de estabelecer um modelo numérico para simulação do processo de tratamento térmico de petróleo para a execução de testes e ajustes do controle *fuzzy* proposto.



## 7. Referências

- Beggs, H.D. and Robinson, J.R.(1975). Estimating the Viscosity of Crude Oil Systems. *Journal of Petroleum Technology*, Vol. 27-9, p.1140-1141.
- Cox, E. (1994). *The fuzzy systems handbook: a practitioner's guide to building, using, and maintaining fuzzy systems*. San Diego, CA : Academic Press Professional.
- Frinhani, R.Q. *et al.* (2007). Estudo da Correlação do Teor de Sal e BSW em Petróleos. *In: 30a Reunião Anual da Sociedade Brasileira de Química,2007, Águas de Lindóia. Livro de Resumos.*
- Galvão, C.O. (1999). Introdução á teoria dos conjuntos difusos. *In: Galvão, C.O., Valença, M.J.S. (orgs.) Sistemas inteligentes: aplicações a recursos hídricos e ciências ambientais*. Porto Alegre: Ed. Universidade/UFRGS : Associação Brasileira de Recursos Hídricos. p. 167-191. (Coleção ABRH de Recursos Hídricos; 7.).
- Garcia, C. (2005). *Modelagem e Simulação de Processos Industriais e de Sistemas Eletromecânicos*. São Paulo: EDUSP.
- Gauto, M. and Rosa, G. (2013). *Química Industrial: Série Tekne*, Porto Alegre: Bookman.
- Luyben, W.L. (1996). *Process modeling, simulation, and control for chemical engineers*. 3ed. Tokyo: McGraw-Hill.
- Mamdani, E.H. (1974). Application of Fuzzy Algorithms for Control of Simple Dynamic Plant. *IEEE (Control and Science)*, v.121(12), p.1585-1588.
- Manning, F.S. and Thompson, R.E. (1995). *Oilfield Processing of Petroleum, Vol 2: Crude Oil*, Tulsa, OK: PennWell Books.
- Mcketta, J.J. (1992). *Heat Transfer Design Methods*. New York: Marcel Dekker.
- Morigaki , M.F. (2010). Salinidade em Petróleo Bruto: Otimização de Metodologia e Proposta de um Novo Método para Extração de Sais em Petróleo. *Quim. Nova*, Vol. 33, No. 3, 607-612.
- Ogata, K. (1985). *Engenharia de controle moderno*. Rio de Janeiro: Prentice/Hall do Brasil, p.929.
- Rezende. S.O. (2005). *Sistemas Inteligentes: Fundamentos e Aplicações*. Barueri/SP: Editora Manole.
- Speight, J. and Baki, O. (2002). *Petroleum Refining Processes*. New York: Marcel Dekker Inc.
- Thomas, J. E. (2004). *Fundamentos de Engenharia de Petróleo*, Rio de Janeiro: Interciência.
- Weber, L. and Klein, P.A.R. (2003). *Aplicação Da Lógica Fuzzy em Software e Hardware*. Canoas: Ed. ULBRA.