



INSTITUTO DE ENGENHARIA NUCLEAR

RT-IEN-06/2002

**A COMPLEXIDADE DE UM SISTEMA DE REGRAS FUZZY
PARA ESTUDO DA CORROSÃO ACELERADA POR VAZÃO
EM COMPONENTES PASSIVOS**

por

***Antonio Cesar Ferreira Guimarães
Celso Marcelo F. Lapa***

Maiο/2002

NOTA

ESTE RELATÓRIO É PARA USO EXCLUSIVO DO
INSTITUTO DE ENGENHARIA NUCLEAR

O direito a utilização de informações relacionadas ao trabalho de pesquisa realizado no IEN é limitado aos servidores da CNEN e pessoal de organizações associadas, nos limites dos termos contratuais que regem os respectivos convênios. O conteúdo dos relatórios não pode ser separado ou copiado sem autorização escrita do IEN



INSTITUTO DE ENGENHARIA NUCLEAR

Título: A COMPLEXIDADE DE UM SISTEMA DE REGRAS FUZZY PARA ESTUDO DA CORROSÃO ACELERADA POR VAZÃO EM COMPONENTES PASSIVOS

Autor(es): Antonio C. F. Guimarães, Celso Marcelo F. Lapa

e-mail: tony@ien.gov.br
lapa@ien.gov.br

Identificação:
RT-IEN-06/2002

Nº de
páginas:
21

Tipo de Divulgação:
Irrestrita (x) Restrita ()

Divulgar para:
IEN

Localização: DIRE/SETER

Publicação externa associada (congresso/periódico):

REVISTA DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA, ISSN 1519-8022

Palavras chave:

Regras Fuzzy, PWR, Corrosão.

Resumo: Este trabalho apresenta uma nova modelagem para o problema de corrosão, FAC – “*Flow-Accelerated Corrosion*” e representação gráfica das simulações realizadas em componentes estruturas e sistemas passivos de uma central nuclear em processo de envelhecimento. Através de um sistema de regras *fuzzy*, baseado apenas em conjuntos de dados característicos da natureza do problema, defini-se um certo número de regras que represente o conhecimento armazenado sobre o sistema. Dada a enorme complexidade oriunda das diversas informações observáveis e sua estrutura não linear o entendimento e previsão do fenômeno de envelhecimento é impossível para um especialista humano. Contudo, com a utilização de metodologias inteligentes, os resultados da previsão podem ser visualizados graficamente, e a partir deste ponto, inferências no espaço de solução de regras podem ser feitas pelo engenheiro que detém o conhecimento especialista.

Abstract:

This report presents the proposal of a new modeling for the graphic representation of results for the corrosion problem, FAC - "*Flow-Accelerated Corrosion*", in components, structures and nuclear passive systems of a nuclear power plant, that is with the aging process. Through a fuzzy rules system and just based on groups of characteristic data of the nature of the problem, a number of rules is defined. The complexity in the new approach appears when several information observed are combined and manipulated for be translated in form of rules by the specialist of the area. The results can be visualized, and starting from this point, inferences in the space of solution of rules can be made by the engineer of the knowledge.

Emissão		Nome	Rubrica	Data
Data: 23/05/2002	Elaboração:	Celso M. F. Lapa e A C F Guimarães.		23/05/2002
Divisão: DIRE		Revisão:	Claudio M N A Pereira	
Serviço: SETER	Aprovação :	Paulo A B. de Sampaio		23/05/2002

Instituto de Engenharia Nuclear:

Via 5 s/n, Cidade Universitária, Ilha do Fundão, CEP 21945-970, CP 68.550, Rio de Janeiro – RJ - Brasil .

Tel.: 00 55 21 2560-4113

Internet: www.ien.gov.br

1. INTRODUÇÃO

O LERs (“*Licensing Event Reports*”), base de dados NPE (“*Nuclear Plant Experience*”), aponta a FAC como o principal fenômeno entre os mecanismos de envelhecimento que atuam numa central nuclear. Consultando a base de dados LERs (entre janeiro de 1990 e abril de 1996) podem ser identificados diversos eventos de falhas relacionados a envelhecimento acelerado por vazão. Em geral, a FAC atinge o desempenho de uma central nuclear de três formas distintas: aumenta a frequência de transientes; aumenta a indisponibilidade dos sistemas de segurança e aumenta a frequência de eventos de sobre refrigeração responsáveis por gerar choque térmico pressurizado.

2. O MECANISMO “CORROSÃO POR VAZÃO ACELERADO”

O mecanismo de degradação por envelhecimento pode ser dividido em dois grupos dependendo dos modos de falhas: (1) aqueles que devem causar ruptura; (2) aqueles que devem causar rachadura. Os mecanismos que causam ruptura são os que mais contribuem para o impacto no risco. Dentre os mecanismos de degradação que causam ruptura selecionou-se o FAC – “*Flow-Accelerated Corrosion*” [1] para objeto de estudo. O mecanismo de corrosão acelerada por vazão é caracterizado por um processo de decomposição da magnetita (Fe_3O_4), sendo esta substituída por óxido de ferro. Frequentemente, uma camada fina de óxido de ferro (magnetita) porosa se forma na superfície interior da tubulação de água e limita a corrosão mais a frente. Entretanto, em alguns casos, esta camada de magnetita é dissolvida e substituída por uma novo óxido de ferro formado na interface metal-óxido, resultando numa tubulação mais fina. Um processo de corrosão similar causa o estreitamento da parede de aço carbono exposto a vapor d’água; este processo é chamado de corrosão acelerada por vazão em duas fases (“*two-phase flow accelerated corrosion*”).

A avaliação por envelhecimento de 22 componentes foi realizado como parte do programa desenvolvido e conhecido como NPAR (“*Nuclear Plant Aging Research*”), durante o período de 1985-1994 (Shah e MacDonald, 1993). Inclui 12 componentes do tipo PWR e 10 do tipo BWR (“*Boiling Water Reactor*”). Dentre os componentes de um PWR mais sujeitos à este fenômenos tem-se: vaso de pressão do reator, contenção, circuito primário, Tubos do gerador de vapor (GV), bombas de refrigeração do reator, pressurizador, mecanismos da barra de controle, geradores Diesel de Emergência, componentes internos do vaso de pressão, suportes do vaso de pressão do reator, tubulações de água de realimentação, e geradores de vapor.

Como ilustrado na Figura 1 (Remy e Bouchacourt, 1992), o processo de evolução do fenômeno FAC pode ser descrito em duas etapas. O primeiro passo consiste na produção de ions de ferro solúveis e seu acúmulo na interface água-óxido. Posteriormente inicia-se uma transferência de massa destes ions dentro do volume líquido. No segundo passo, a vazão de água remove os ions ferrosos solúveis por um mecanismo convectivo de transferência de massa, o qual é um gradiente de difusão que governa o processo. Em geral, a concentração de ions ferrosos no interior do volume líquido é muito menor do que na superfície água-óxido.

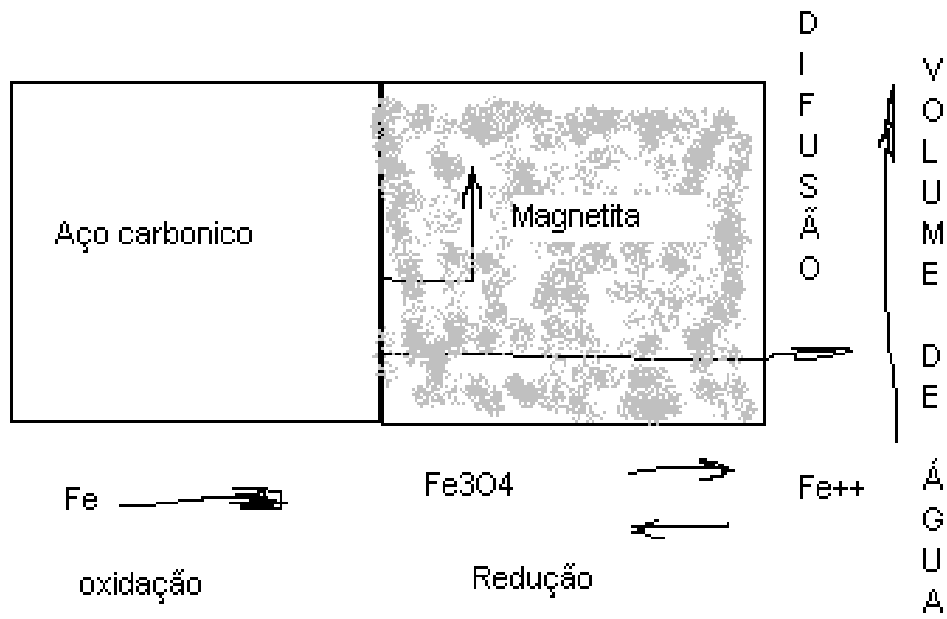


Figura 1 – Modelo de corrosão acelerada por vazão (Remy e Bouchacourt, 1992).

3. OS MODELOS EXISTENTES

Para cada mecanismo de envelhecimento existem modelos quantitativos para estimar o dano por envelhecimento em componentes passivos de reatores do tipo PWR. Somente os relativos à FAC serão apresentados, uma vez que os demais não serão analisados neste trabalho. Diversos modelos FAC [1] foram desenvolvidos nos últimos anos por fabricantes e vendedores de equipamentos nucleares. Os dois mais importantes são o modelo e código “WATHEC” de propriedade da KWU (“*Kraftwerk Union*”) – KR (Kastner and Riedle, 1986) e o “CHECWORKS” da EPRI (“*Electric Power Research Institute*”) – CH (Chexal et al., 1996). Diferentemente do primeiro, o segundo modelo não é bem documentado, talvez em virtude de sua natureza privada. Além destes cabe citar um modelo empírico (faz parte do código BRT – Cicero) que foi desenvolvido por Eletricité de France (EDF) e é baseado em dados experimentais obtidos de um simulador de teste Cicero (Chexal, et al., 1996). Por ser de natureza proprietária privada, também não é bem documentado. Os nossos estudos foram baseados nos resultados e experimentos produzidos pelo modelo da EPRI pela facilidade de extração dos dados.

A FAC é um fenômeno complexo e é função de muitos parâmetros, sendo assim certos modelos predizem resultados observáveis mas com grande incertezas nos valores. Geralmente, o método de simulação Monte Carlo é adotado para tratar as incertezas associadas a esses parâmetros. Não obstante, mesmo quando os parâmetros de entrada são bem conhecidos, a predição realizada por estes modelos permanece imprecisa.

4. O SISTEMA DE REGRAS FUZZY

A modelagem baseada em Sistemas de Regras *Fuzzy* tem como ponto central a definição e a verificação de um Sistema de Regras [2]. A definição das regras é o procedimento onde o conhecimento e/ou dados disponíveis são transcritos em sentenças. A verificação se dá por comparação da performance dos resultados previstos pelo sistema com um conjunto de teste até então desconhecido pelo sistema.

Uma Regra *Fuzzy*, é formada por argumentos e respostas unidos por operadores lógicos formando condições e uma correspondente consequência. Cada Regra *Fuzzy* pertence a um espaço e deve ser definida a partir de um mesmo conjunto de argumentos, assim como suas respostas devem pertencer a um mesmo domínio. Nesses conjuntos os elementos não podem ser definidos em bases binárias (pertence e não pertence) porque seu contorno não está bem definido. Assim, na Lógica *Fuzzy*, uma expressão e o seu inverso podem ser verdadeiros para um certo grau, cuja variação pode ser distribuída entre 0 e 1. Para a definição de um Sistema de Regras *Fuzzy* identificam-se quatro opções:

as regras são conhecidas por especialistas e podem ser definidas diretamente; as regras podem ser avaliadas pelos especialistas, mas os dados disponíveis devem ser utilizados para construí-las; as regras não são conhecidas explicitamente, mas as variáveis requeridas para descrição do sistema podem ser especificadas por especialistas; e, finalmente, quando um conjunto de observações está disponível e o sistema de regras tem de ser definido de forma a descrever as interconexões entre os elementos do conjunto de dados.

4.1. IDENTIFICAÇÃO DOS ARGUMENTOS E RESPOSTAS DO SISTEMA

A taxa de corrosão acelerada por vazão fase simples foi obtida para nosso estudo a partir dos resultados gerados pelo modelos KWU e EPRI e está apresentado nas Figuras 2, 3 e 4. Na Figura 2, a taxa de corrosão (in/yr) é função da variação da temperatura ($^{\circ}\text{F}$) e do pH. A taxa de corrosão foi calculada para dois valores de pH (9.4 e 8.7). Os resultados foram exibidos para efeito de comparação entre as duas metodologias (KWU e EPRI). Na Figura 3, a taxa de corrosão (in/yr) é função da variação da temperatura ($^{\circ}\text{F}$) e do oxigênio. Na Figura 4, a taxa de corrosão (in/yr) é função da variação da temperatura ($^{\circ}\text{F}$) e da taxa de vazão (ft/s). Na Figura 2, a taxa de corrosão está definida no intervalo [0, 0.07]. As condições iniciais adotadas para a modelagem são:

T pertence [100, 500] e pH = 8.0 implica corrosão = 0.07

T pertence [100, 500] e pH diferente de 8.0 implica corrosão = 0.00

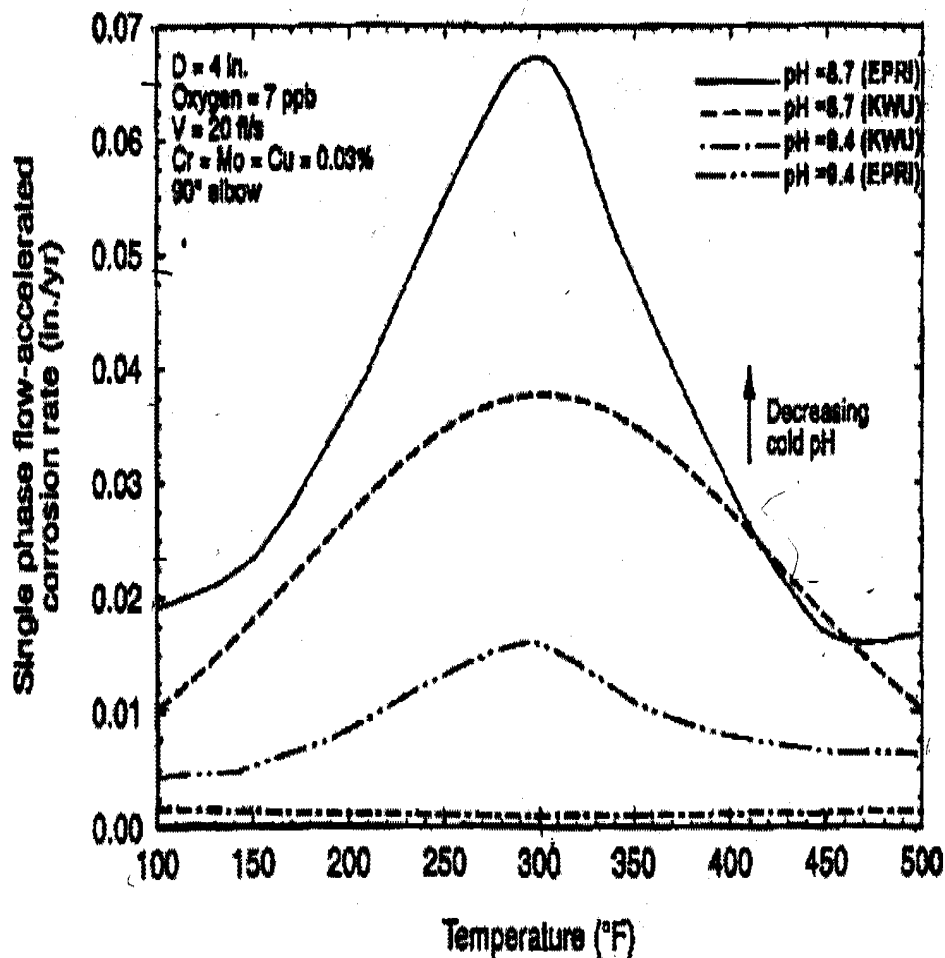


Figura 2 – Comparação entre os modelos EPRI-CH e o KWU-KR para variações de pH.

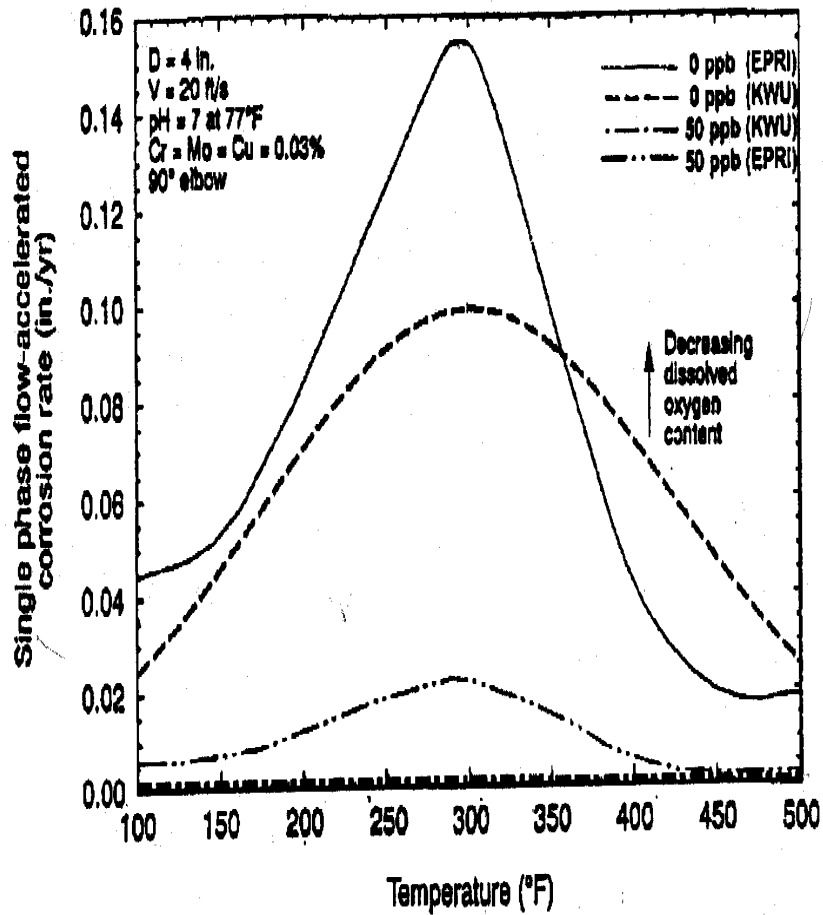


Figura 3 – Comparação entre os modelos EPRI-CH e o KWU-KR para variações de oxigênio

Na Figura 3, a taxa de corrosão está definida no intervalo $[0, 0.16]$. As condições iniciais adotadas para a modelagem são:

T pertence $[100, 500]$ e oxigênio = 0 implica corrosão = 0.16

T pertence $[100, 500]$ e oxigênio diferente de 0 implica corrosão = 0.00

Na Figura 4, a taxa de corrosão está definida no intervalo de $[0, 0.20]$. As condições iniciais adotadas para a modelagem são:

T pertence [100, 500] e taxa de vazão = 30 implica corrosão = 0.20

T pertence [100, 500] e taxa de vazão diferente de 30 implica corrosão = 0.00

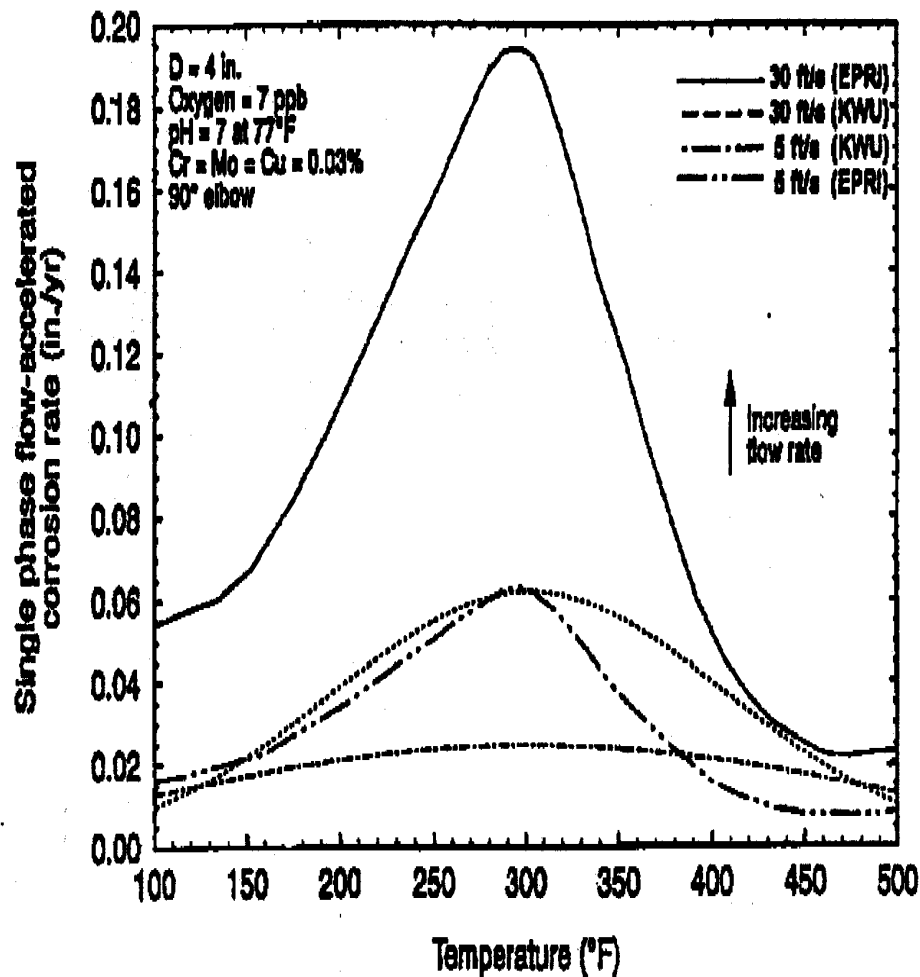


Figura 4 – Comparação entre os modelos EPRI-CH e o KWU-KR para variações da taxa de vazão.

4.2. FUNÇÕES DE PERTINÊNCIA

Foram consideradas algumas premissas na formulação da modelagem:

1. argumento pH é representado por 5 funções, a temperatura por 3 funções, a variável relativa ao nível de oxigênio foi representada por 11, e a taxa de vazão por 5 funções.
2. A origem de cada função de pertinência (com exceção da primeira) deve coincidir com a abcissa de ordenada 1 da função anterior, o que garante que para qualquer temperatura e pH o sistema trabalhará com mais de uma regra.
3. Os suportes das funções de pertinência são uniformes, isto é, tem a mesma dimensão.
4. formato das funções é triangular.
5. A modelagem *fuzzy* foi realizada utilizando o ambiente de programação ToolboxFuzzy do MATLAB [3].

4.3. O MÉTODO DE IMPLICAÇÃO

Para o estudo em questão quatro parâmetros de entrada foram considerados: o pH (*input1*), a temperatura (*input2*), o oxigênio (*input3*), e a taxa de vazão (*input4*); e um de saída, a taxa de corrosão (*output1*). Pela observação das Figuras 2, 3 e 4 pode-se verificar que a taxa de corrosão de fato é sensível às quatro variáveis de entrada. Na Figura 5, estas informações são reunidas graficamente após a implementação imediata do número de variáveis do problema. Considerando o modelo adotado (Mamdani) os parâmetros de implicação escolhidos foram: método AND – mínimo; implicação – mínimo; agregação – máximo; e o método de defuzzificação - centróide.

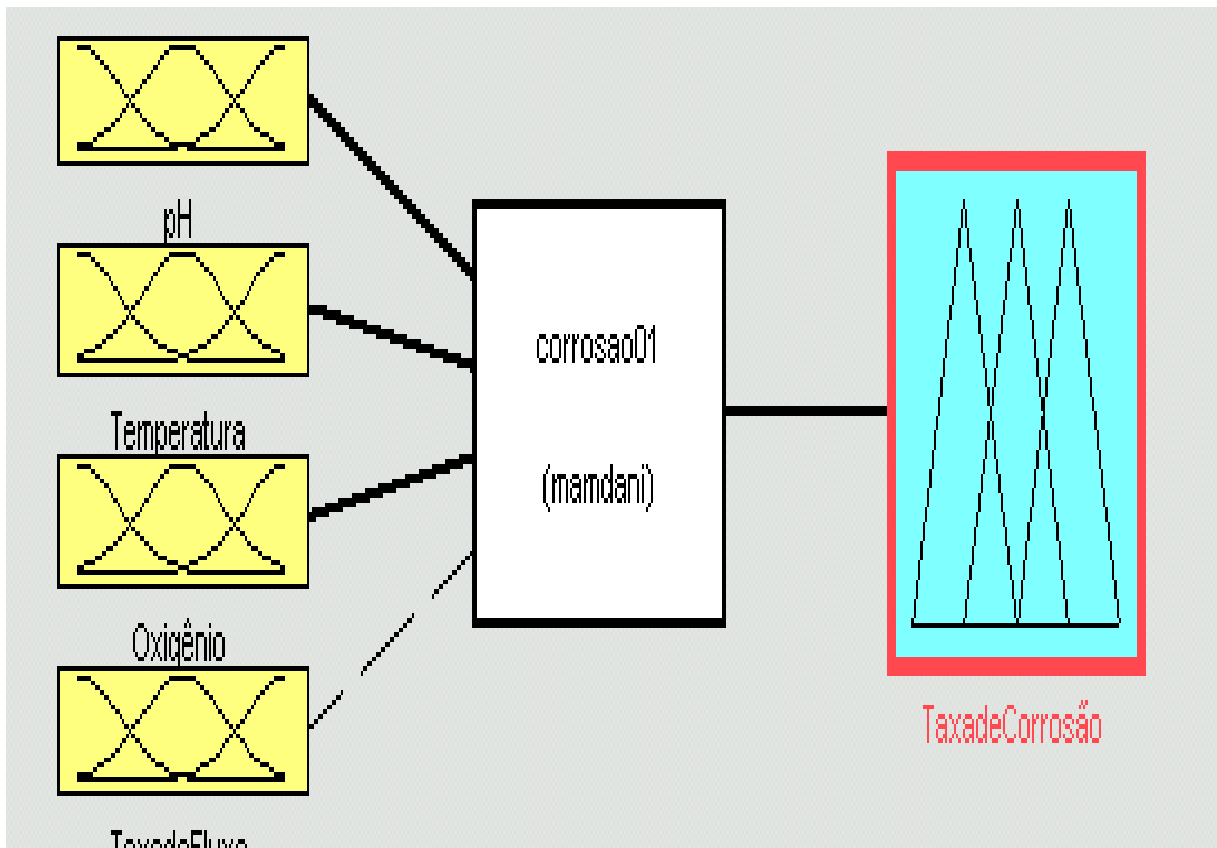


Figura 5 – Esquema de composição entre as variáveis do problema

4.4. FUNÇÕES DE PERTINÊNCIA PARA O Ph

A primeira variável de entrada (*input1*) é o pH. Pela observação da Figura 2 ou pela utilização das condições iniciais estabelecidas para o problema, o intervalo para o universo de discurso desta variável é $[0, 10]$. Conforme estabelecido, 5 funções de pertinência foram utilizadas para discretizar o universo da variável. Na Figura 6 estas informações são reunidas graficamente após a implementação imediata do número de variáveis do problema. Utilizando o editor da função de pertinência (*membership function*) pode-se definir o nome de cada função, o número e o tipo de função e a discretização do universo de discurso.

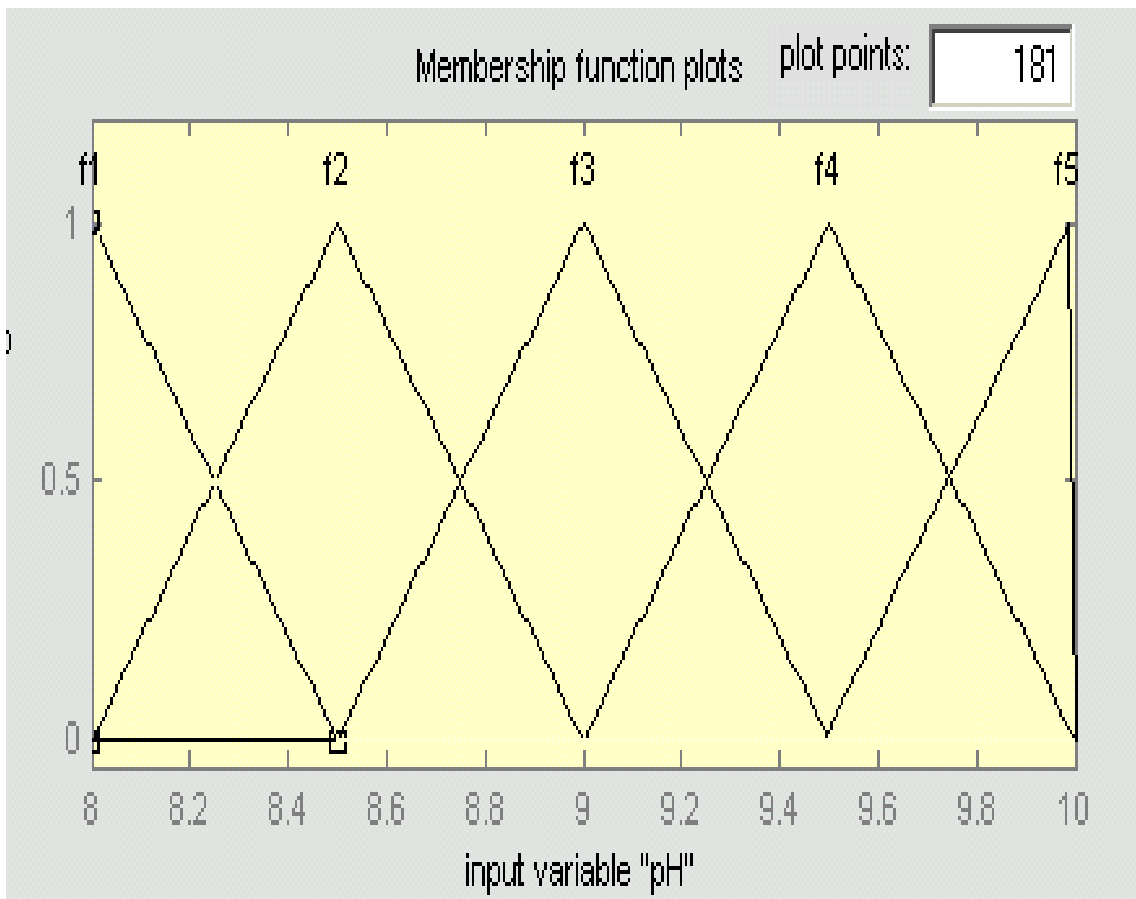


Figura 6 – Variável de entrada “pH” (*input1*)

4.5. FUNÇÕES DE PERTINÊNCIA PARA A TEMPERATURA

A variável de entrada 2, *input2*, possui um intervalo para seu universo de discurso entre [100, 500] conforme as hipóteses iniciais estabelecidas. Neste estudo foi utilizado um intervalo de [100, 300] para aproveitamento da simetria verificada na Figura 2. Utilizando o editor da função de pertinência (*membership function*), estas informações são implementadas e representada na Figura 7. Pode-se, ainda, definir o nome de cada função, o número e o tipo de função e a discretização do universo de discurso.

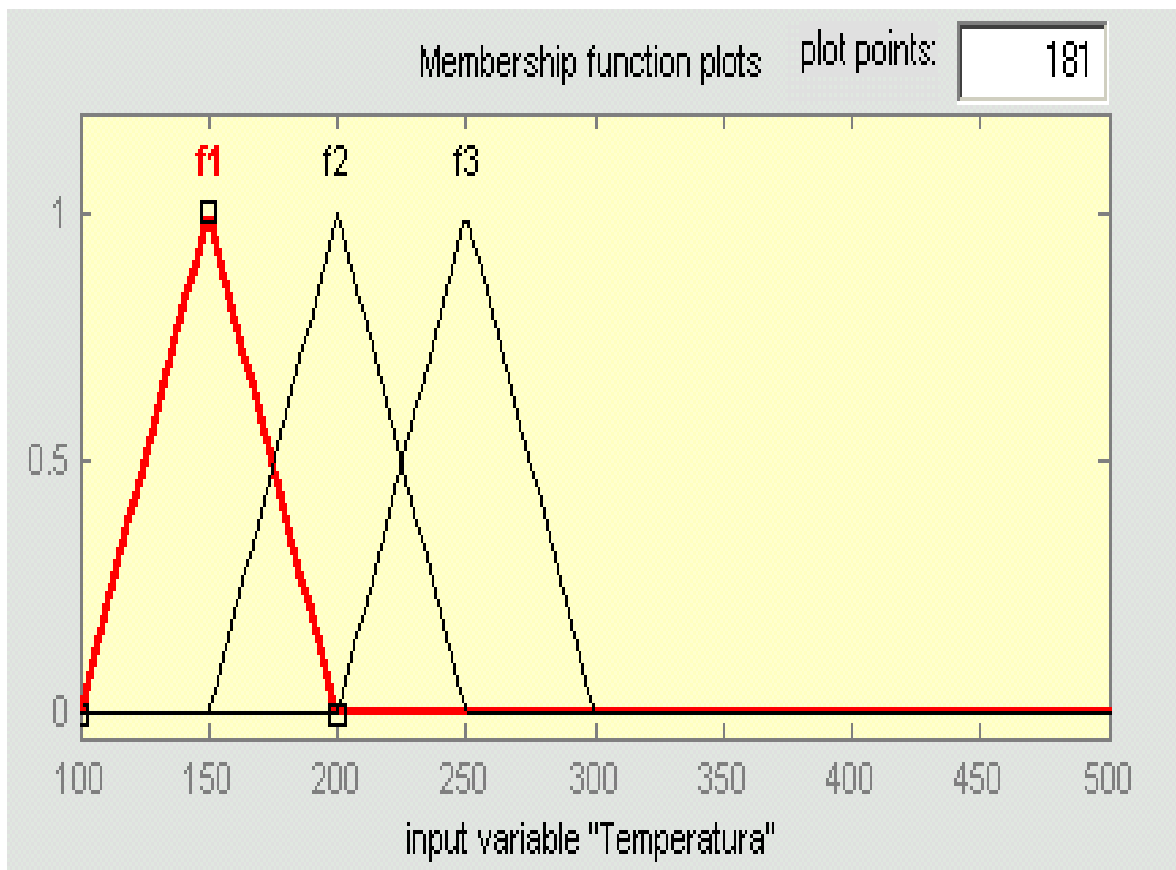


Figura 7 – Variável de entrada “Temperatura” (*input 2*)

4.6. FUNÇÕES DE PERTINÊNCIA PARA O OXIGÊNIO

A variável de entrada 3, *oxigênio*, possui um intervalo para seu universo de discurso entre [0, 50], conforme as hipóteses iniciais estabelecidas. Para este estudo foi utilizado o intervalo de [100, 300], pois, existe simetria para a taxa de corrosão. Utilizando o editor da função de pertinência (*membership function*), estas informações são implementadas e estão graficamente representada na Figura 8. Pode-se definir o nome de cada função, o número e o tipo de função e a discretização do universo de discurso.

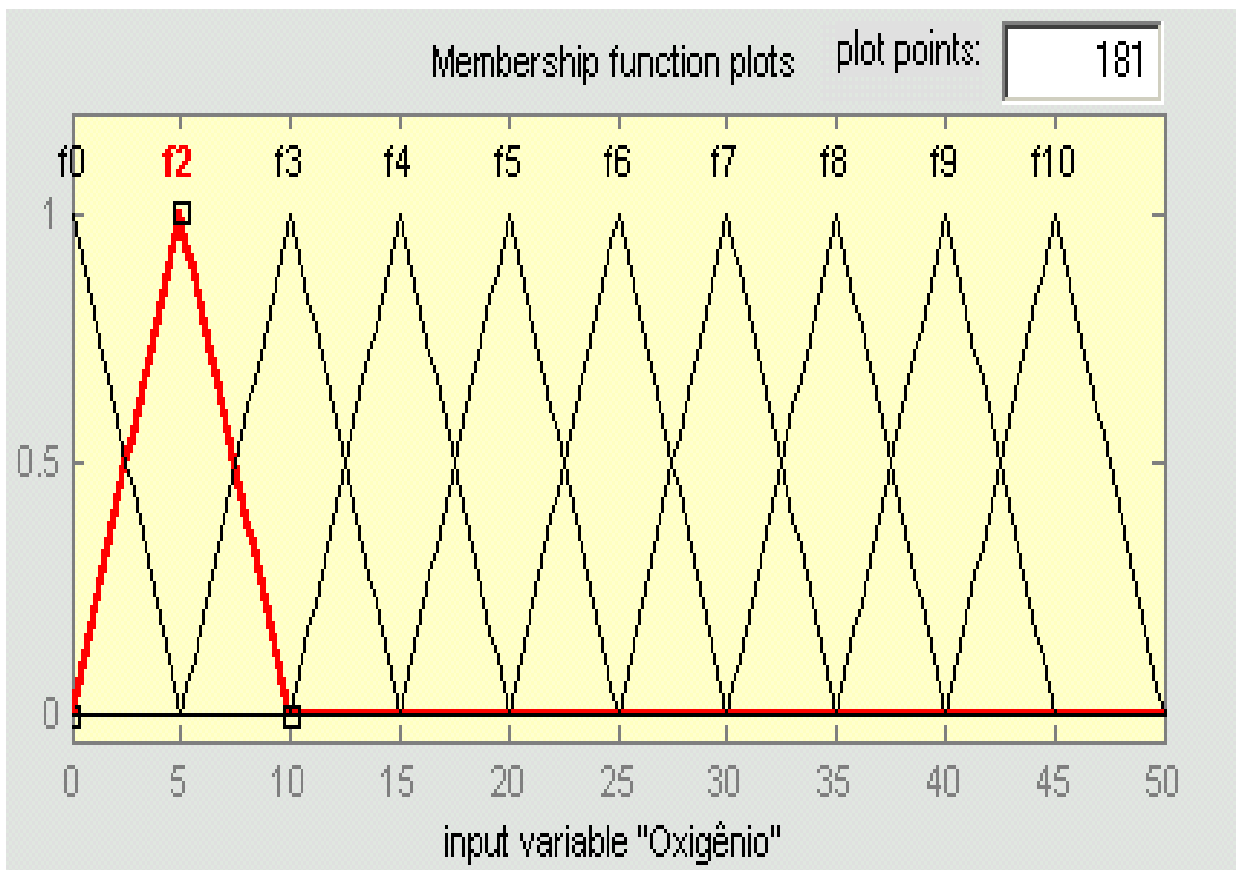


Figura 8 – Variável de entrada “Oxigênio” (*input3*)

4.7. FUNÇÕES DE PERTINÊNCIA PARA A TAXA DE VAZÃO

A variável de entrada 4, *taxa de vazão*, possui um intervalo para seu universo de discurso entre [100, 500], conforme as hipóteses iniciais estabelecidas. Para este estudo foi utilizado o intervalo de [100, 300], dada a simetria verificada na Figura 2.

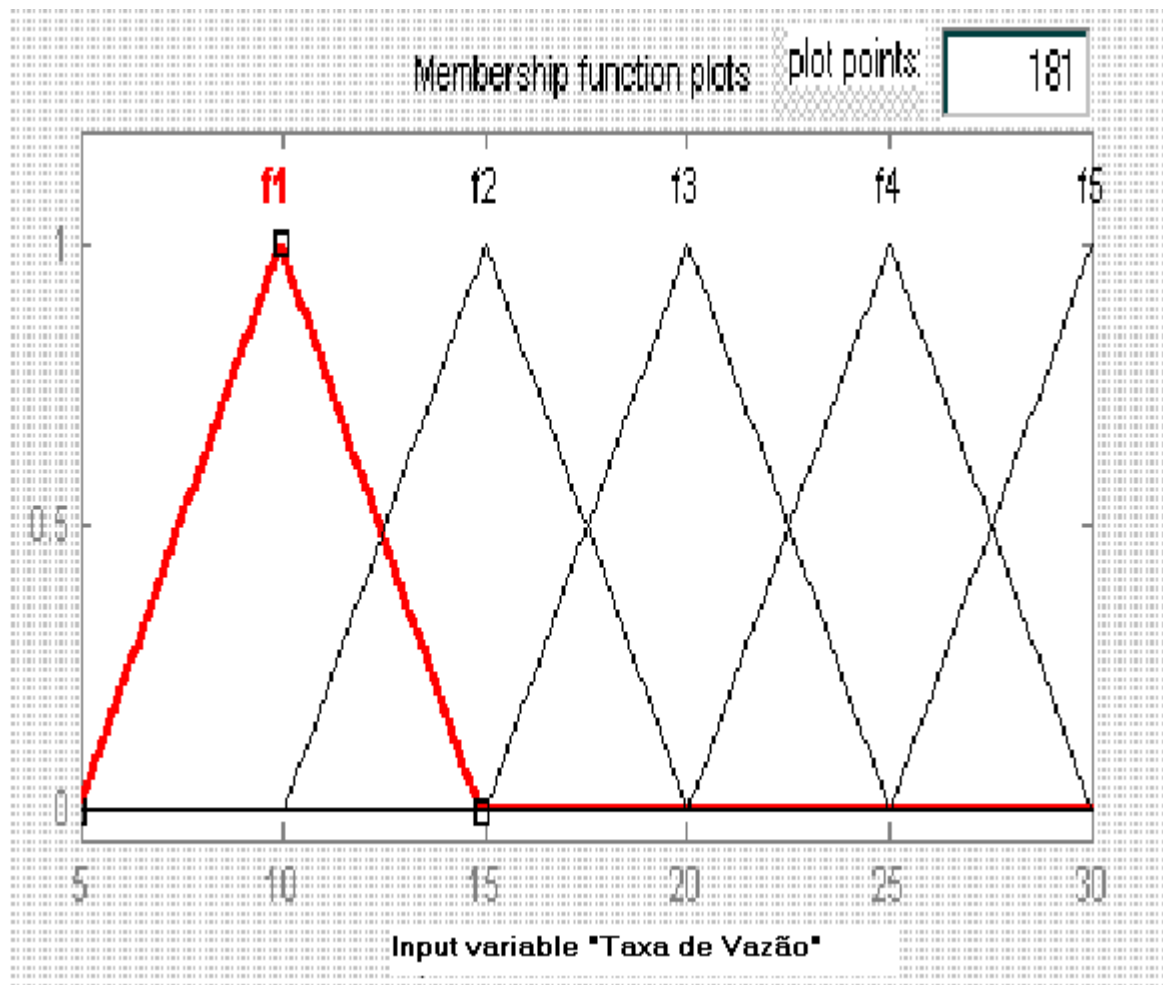


Figura 9 – Variável de entrada “Taxa de Vazão” (*input4*)

Utilizando o editor da função de pertinência (*membership function*), estas informações são implementadas graficamente representada na Figura 7. Este ainda permite definir o nome de cada função, o número e o tipo de função e a discretização do universo de discurso.

4.8. FUNÇÕES DE PERTINÊNCIA PARA AS TAXAS DE CORROSÃO

A variável de saída, *taxa de corrosão*, possui um intervalo de valores definido para seu universo de discurso de [0.00, 0.2], conforme as hipóteses inicialmente estabelecidas. Um total de 10 funções de pertinência foram utilizadas para este exemplo. Na Figura 10 estas informações são graficamente representadas. O editor da função de pertinência (*membership function*) permite definir o nome de cada função, o número e o tipo de função e a discretização do universo de discurso.

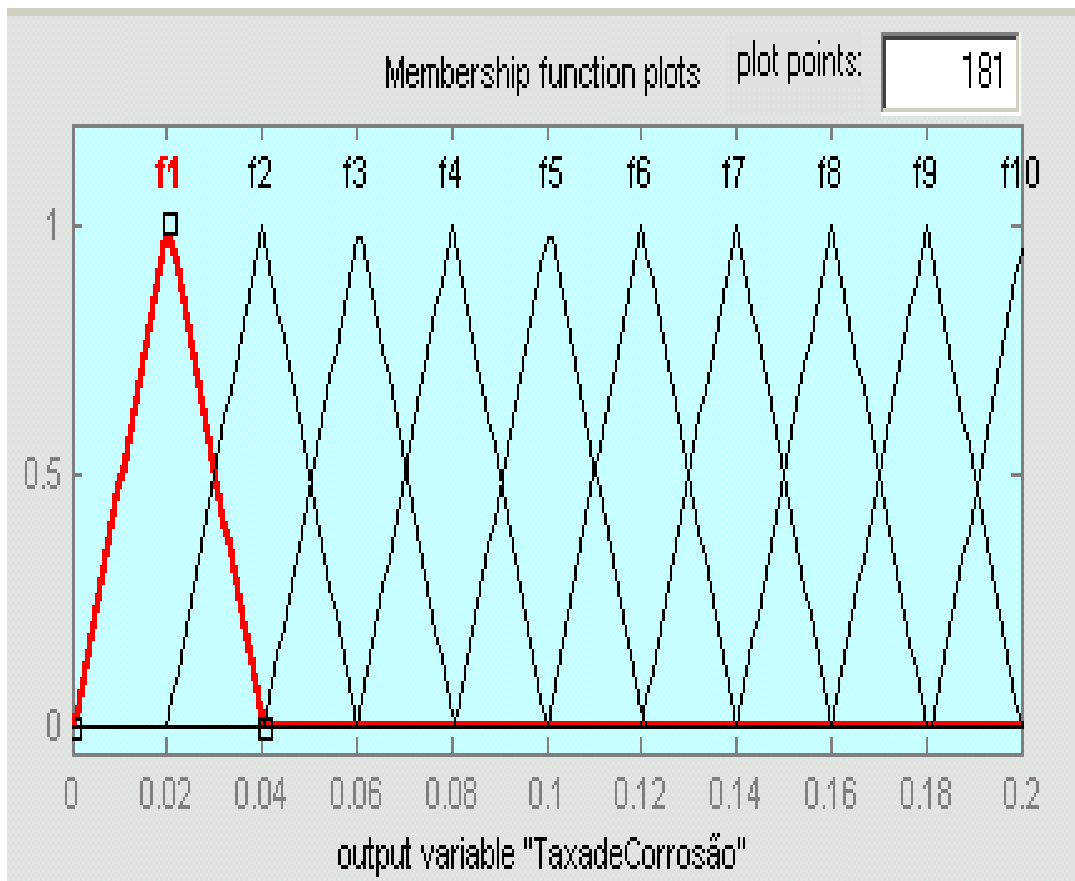


Figura 10 – Variável de saída “Taxa de Corrosão” (*output1*)

4.9. O SISTEMA DE REGRAS FUZZY

O sistema de Regras *Fuzzy* será criado com as entradas antecedentes *input1*, *input2*, *input3*, *input4* e com a saída *output1*. Para tal, as Figuras 2, 3 e 4 serão utilizadas para verificar os valores correspondentes de comportamento em cada função para cada variável de entrada e o valor esperado da variável de saída em cada função de saída. É importante lembrar neste ponto, que para se desenvolver o sistema de regras alguns valores foram retirados do gráfico comparativo da metodologias KWU e EPRI, proporcionando assim, a confirmação imediata da metodologia alternativa *fuzzy*. Em acréscimo, caso se tenha um conjunto de dados experimentais específicos os mesmos podem ser utilizados para definição do modelo. O conhecimento de um especialista da área pode e deve ser utilizado também para o desenvolvimento de um conjunto de dados na ausência de um protótipo ou de um experimento em escala. Na Figura 11, foram apresentadas algumas regras do conjunto final, num total de 57. A Figura 12 é uma apresentação parcial gráfica do sistema de regras, e onde se pode verificar visualmente a possibilidade de modificação nas variáveis de controle para se obter novos valores para a taxa de corrosão.

1. If (pH is f2) and (Temperatura is f1) then (TaxadeCorrosão is f1) (1)
2. If (pH is f2) and (Temperatura is f1) then (TaxadeCorrosão is f2) (1)
3. If (pH is f2) and (Temperatura is f2) then (TaxadeCorrosão is f1) (1)
4. If (pH is f2) and (Temperatura is f2) then (TaxadeCorrosão is f2) (1)
5. If (pH is f2) and (Temperatura is f2) then (TaxadeCorrosão is f3) (1)
6. If (pH is f2) and (Temperatura is f3) then (TaxadeCorrosão is f1) (1)
7. If (pH is f2) and (Temperatura is f3) then (TaxadeCorrosão is f2) (1)
8. If (pH is f2) and (Temperatura is f3) then (TaxadeCorrosão is f3) (1)
9. If (pH is f2) and (Temperatura is f3) then (TaxadeCorrosão is f4) (1)
10. If (pH is f3) and (Temperatura is f1) then (TaxadeCorrosão is f1) (1)

Figura 11 – Sistema de regras *fuzzy* parcialmente exibido.

Define-se um ou mais valores para cada antecedente bastando apenas mover a linha vertical visualizada em cada uma das variáveis e de imediato o valor resultante é ajustado e exibido na parte superior da tela. (por ex.: *pH = 9*, *temperatura = 300*, *oxigênio = 25*, *taxa de fluido = 17.5* e *taxa de corrosão = 0.1*)

Este tipo de sistema adaptativo, conhecido como “controlador *fuzzy*”, constitui a base para o desenvolvimento de um sistema inteligente.

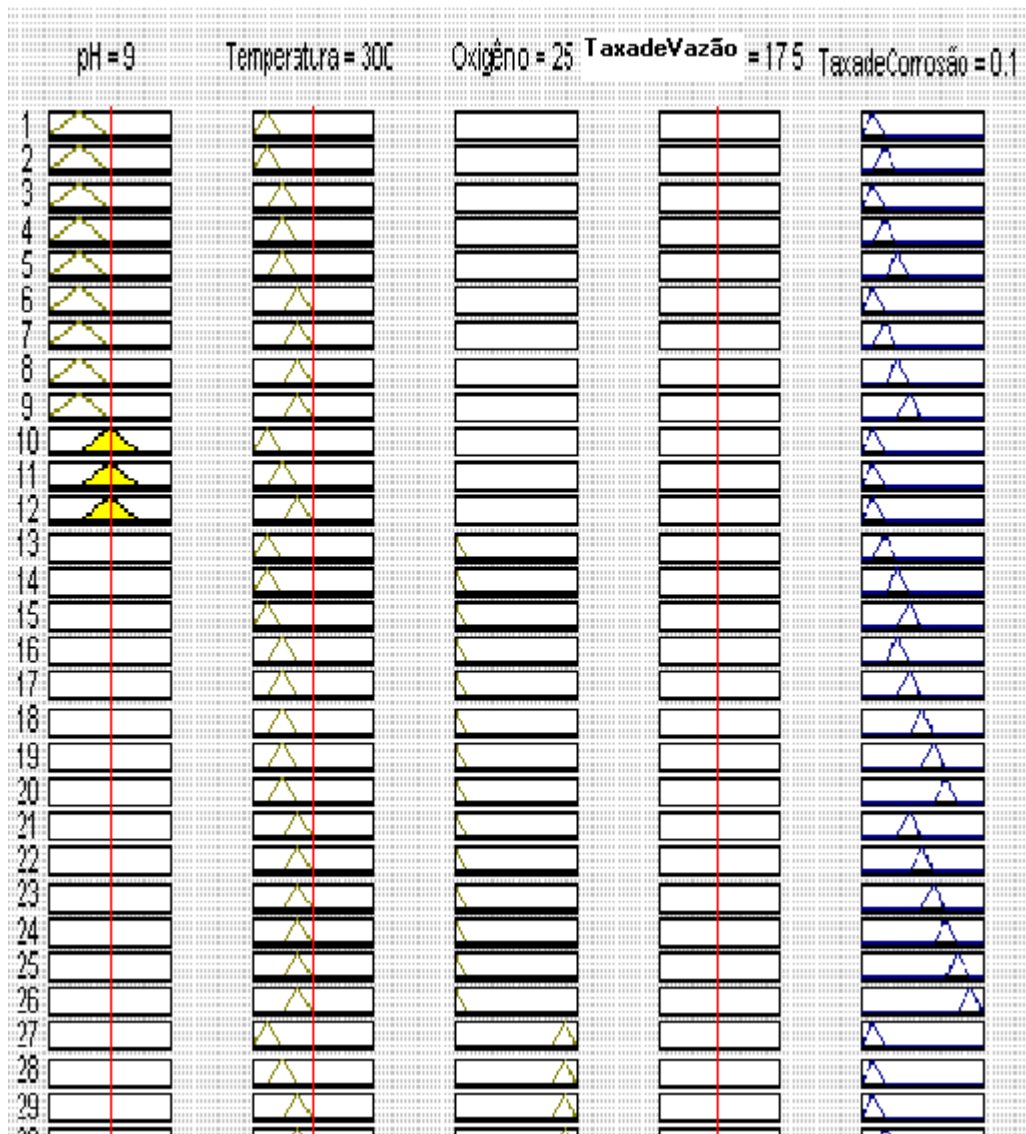


Figura 12 – Gráfico do sistema de regras

5. RESULTADOS OBTIDOS

Nas Figuras 13, 14, e 15, são apresentados os resultados finais. Estes refletem a variação da taxa de corrosão (*output1*) como função da variação do pH (*input1*), da Temperatura (*input2*), do oxigênio (*input3*) e da taxa de vazão (*input4*). Através do *Surface Viewer*, do toolboxFuzzy, exibe-se a superfície com as entradas e a saída pretendidas. Os eixos X (*input1*) e Y (*input2*) podem ser discretizados para maior ou para menor resolução, conforme o resultado final desejado. O dado de entrada pode ser modificado para exibir outro tipo de gráfico, ou seja, a taxa de corrosão como função do pH e da temperatura, do oxigênio e da temperatura ou da taxa de vazão e da temperatura.

É importante lembrar que apenas um conjunto reduzido de regras foi gerado e representado graficamente, o que pode ser observado nas figuras. Desejou-se com isto mostrar que, mesmo utilizando um conjunto reduzido, pode-se observar o comportamento das variáveis em questão. Podendo-se, a qualquer momento, realizar-se a inserção de mais regras na base de conhecimento.

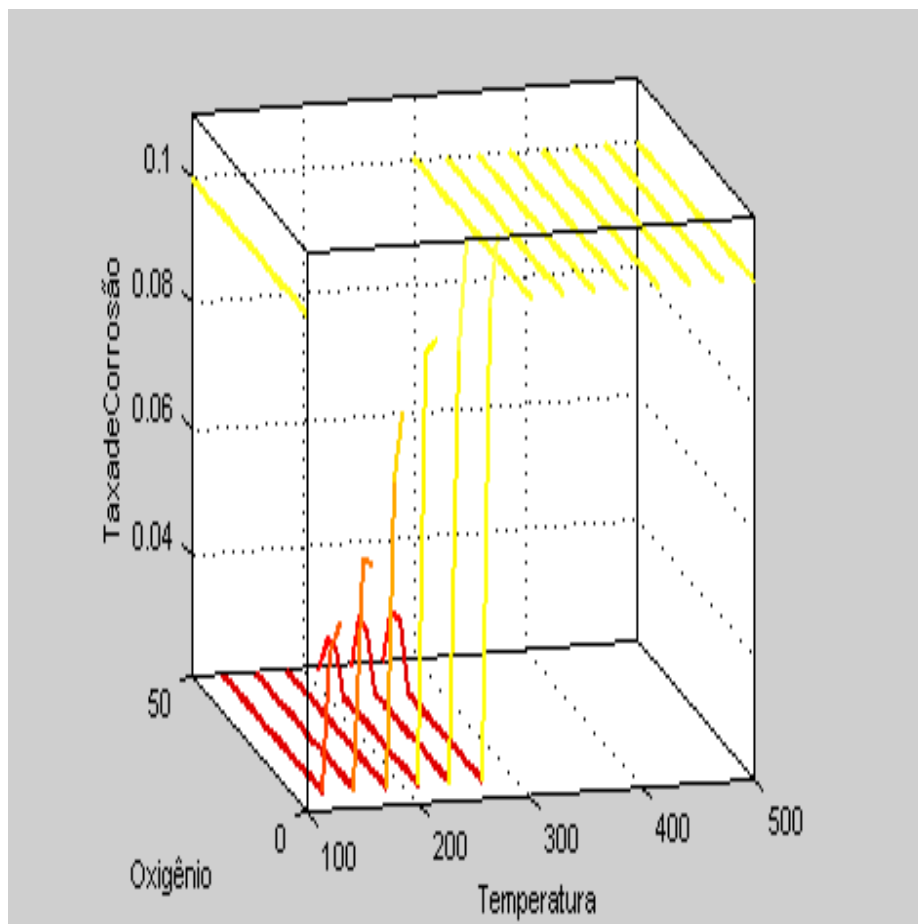


Figura 13 – Taxa de corrosão como função da temperatura e do oxigênio.

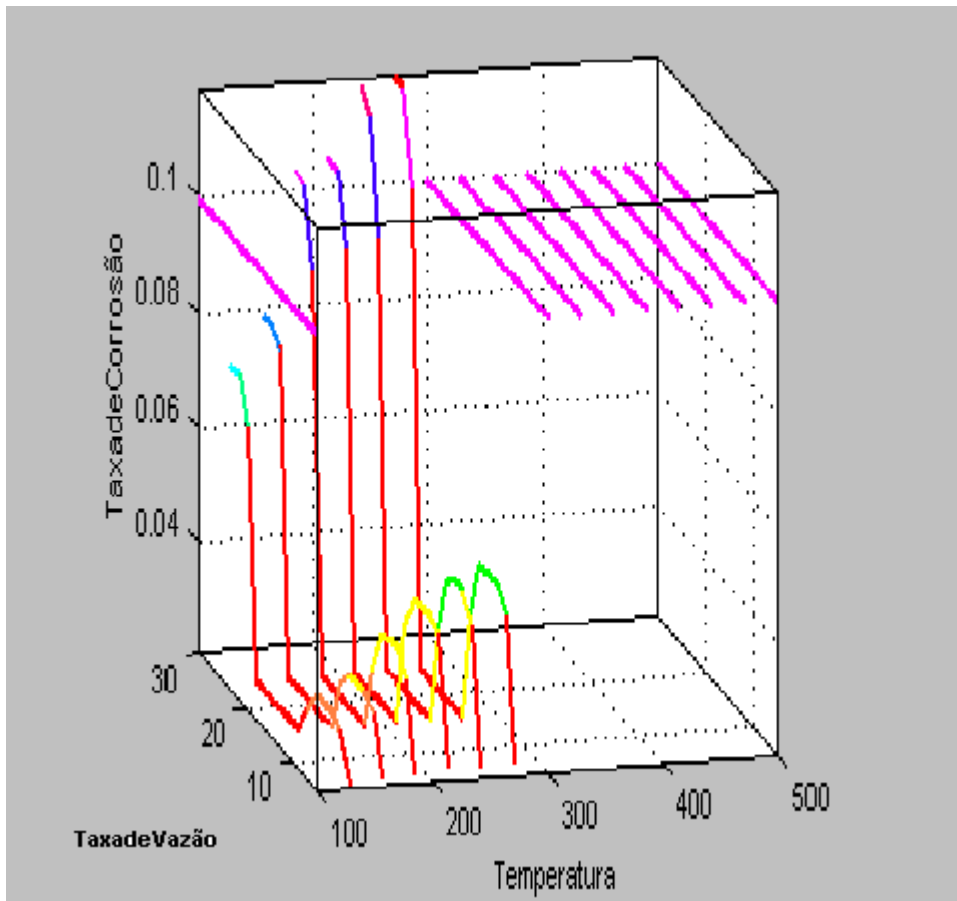


Figura 14 – Taxa de Corrosão como função da Temperatura e da Taxa de Vazão.

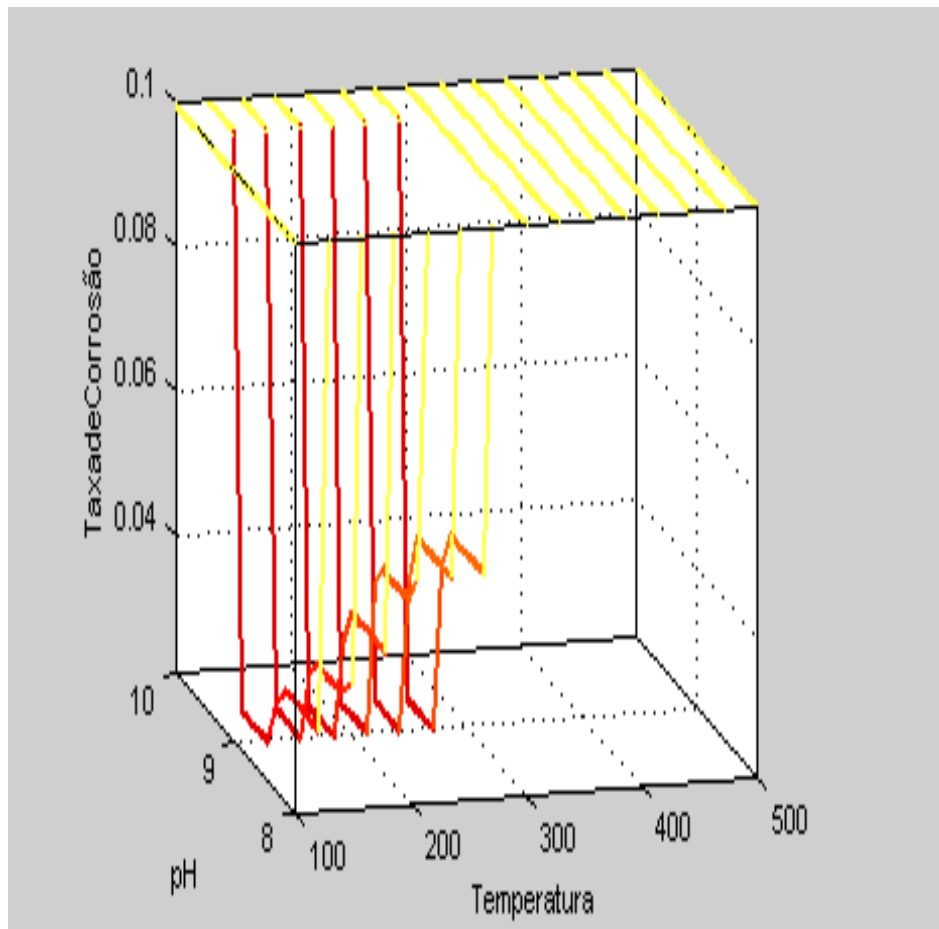


Figura 15 – Taxa de corrosão como função da temperatura e do pH.

6. CONCLUSÕES

Ao se comparar as Figuras 2, 3 e 4 com a Figura 13, 14 e 15, podemos concluir que quanto maior a temperatura, menor o pH, menor o Oxigênio, e maior a taxa de vazão, maior a “Taxa de Corrosão”. O que pode ser visto nas superfícies geradas e apresentadas nas Figuras 13, 14 e 15.

As variáveis utilizadas neste trabalho, taxa de corrosão, temperatura, pH, Oxigênio, e a taxa de vazão foram utilizadas para efeito de ilustração do método. Um certo grau de complexidade surge quando mais de uma variável de entrada é utilizada para modelar o problema, fazendo com que a base de conhecimento fique com um conjunto de regras maior. São 24 regras, para o caso de uma variável do tipo pH [4], contra 57 para o segundo caso que usa o pH, o oxigênio e a taxa de vazão. O engenheiro possuidor de conhecimento especialista deverá raciocinar com mais de um grau de liberdade para sua inferência *fuzzy*. O que torna o sistema de regras bem mais complexo.

Neste exemplo os dados para definição da base de conhecimento e treinamento foram retirados diretamente dos gráficos contendo os resultados finais devido a uma modelagem convencional. A ausência da modelagem empírica da KWU ou EPRI e de um conjunto de dados experimentais em um problema complexo e com muitas variáveis, como no caso da FAC, não impede que com um conjunto de regras e um conjunto de dados observáveis reproduza os resultados e conclusões ideais.

Em geral, o desenvolvimento de uma modelagem passa por um processo complicado, árduo e muitas das vezes com um grau de incerteza muito grande. Desde o total entendimento do problema a ser analisado quanto a definição de um modelo. Além disto, técnicas matemáticas e principalmente, um experimento rico em dados e resultados para validação deste modelo devem fazer parte do arcabouço do pesquisador.

Comparativamente a estudos anteriores, onde houve uma grande necessidade de programação (para modelar as funções de pertinências, mecanismos de implicação e defuzzificação, geração das regras etc) a utilização deste ambiente de programação com implementação rápida facilitou a representação e a modelagem do problema analisado e a visualização dos resultados.

Construído o sistema especialista, o usuário passa a contar com um conjunto de regras onde pode realizar inferências ao conhecimento de maneira segura, dispensando grande tempo computacional e de experimento.

Como proposta futura de trabalho, cabe desenvolver um simulador “inteligente”, utilizando o controlador *fuzzy* produzido neste trabalho, de forma a manter a taxa de corrosão dentro de níveis esperados, através da monitoração das variáveis de controle do sistema.

Finalmente, para situações de difícil modelagem e de obtenção de dados acredita-se que esta alternativa de representação, através de um Sistema de Regras *Fuzzy*, seja de vital importância e de capacidade potencial se comparada a metodologia de cálculo tradicional.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Smith, et all, “Incorporating Aging Effects into Probabilistic Risk Assessment – A Feasibility Study Utilizing Reliability Physics Models”, NUREG/CR-5632, November, 2000.
- [2] Moura, L. A, Modelagem do Fenômeno de Consolidação Através de um Sistema de Regras *Fuzzy*. Tese de mestrado. Maio de 1998, COPPE/UFRJ, RJ – BRASIL.
- [3] *Fuzzy* Logic Toolbox User’s Guide do MatLab 6, 2000.
- [4] Guimarães, A. C. F., Tech. Rep., RT-IEN-02/2002.