

APLICAÇÃO DE LÓGICA FUZZY NO CONTROLE DE DESOBSTRUÇÃO DE TUBULAÇÕES FLEXÍVEIS

Carlos Henrique Dittz¹, Ricardo Tanscheit², Marley Vellasco², Marcelo Gonçalves¹

¹Centro de Pesquisa e Desenvolvimento da Petrobras – CENPES
Divisão de Exploração, 21949-900 Rio de Janeiro, RJ

²Departamento de Engenharia Elétrica – PUC-Rio
CP 38.063, 22452-970 Rio de Janeiro, RJ - Brasil

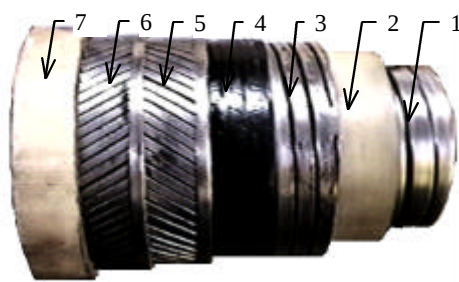
e-mails: [chdittz, marcelog]@cenpes.petrobras.com.br, [ricardo, marley]@ele.puc-rio.br

Resumo

A indústria do petróleo utiliza tubulações flexíveis em larga escala para a produção de campos submarinos. Devido às temperaturas encontrada em águas profundas, muitas destas linhas ficaram totalmente obstruídas. O grande estoque de linhas consideradas irrecuperáveis motivou o desenvolvimento e implantação de um método de desobstrução com o uso de corrente elétrica, cuja operação é efetuada manualmente. Neste trabalho, apresenta-se o uso da equação da energia em uma simulação numérica do aquecimento elétrico para analisar a possibilidade de se automatizar a operação com o auxílio da lógica *fuzzy*. A lógica *fuzzy* fornece o ferramental para se traduzir em termos matemáticos as ações dos operadores humanos. O controlador *fuzzy* resultante é avaliado em dois casos distintos: uma linha de média extensão, com concentração de parafina em regiões específicas; e uma linha de pequenas dimensões, com distribuição uniforme de parafina em seu interior. Em ambos os casos o controle automático apresentou um desempenho semelhante ao controle efetuado por um operador humano, demonstrando, portanto, que o processo de desobstrução de linhas flexíveis pode ser automatizado eficientemente através da utilização de lógica *fuzzy*.

1 Introdução

Na interligação dos poços submarinos com as instalações marítimas de produção são utilizadas tubulações, também chamadas de linhas flexíveis, que são constituídas de uma série de camadas metálicas e plásticas (Figura 1) que conferem estanqueidade, resistência mecânica e facilidade de dobramento, ou flexibilidade.



1. Carcaça
2. Camada de pressão de Rilsan
3. Fio Zeta
4. Fita antifricção
5. Primeira armadura
6. Segunda armadura
7. Capa externa

Figura 1 - Camadas de uma linha flexível.

A obstrução das tubulações flexíveis utilizadas para escoar a produção começou a ocorrer quando a PETROBRAS passou a produzir campos de petróleo localizados em águas profundas. Conforme se avança para locais de grandes profundidades, a temperatura encontrada no fundo do mar decresce, chegando a atingir 4 °C. Muitos petróleos encontrados nestas locações apresentam como característica a cristalização de determinadas frações quando a sua temperatura cai abaixo de determinado valor. Esta temperatura, chamada de TIAC (Temperatura Inicial de Aparecimento de Cristais), é facilmente atingida em águas profundas devido às condições ambientais a que as linhas flexíveis estão expostas. Como resultado, parte do petróleo transforma-se em cristais, basicamente compostos por parafinas, que se aglutinam e aderem às paredes das tubulações até o ponto em que se forma um bloqueio completo.

Até o aparecimento de soluções que remediasses o problema, acumulou-se um grande estoque de linhas totalmente bloqueadas com parafina, já que o procedimento adotado quando ocorre uma obstrução é a retirada da linha e o seu encaminhamento para instalações em terra para desobstrução. Esta limpeza consiste na aplicação de um diferencial de pressão, respeitando-se os limites de operação para os quais as linhas foram projetadas, até o ponto em que o bloco de parafina é forçado a se deslocar para fora das linhas flexíveis. Entretanto, este procedimento nem sempre é bem sucedido. O valor imobilizado de linhas obstruídas, acrescido dos custos de armazenagem, fez com que o CENPES investigasse métodos alternativos de limpeza do estoque considerado perdido. O resultado foi a concretização de uma idéia antiga, mas nunca realizada, de se utilizar as camadas metálicas das linhas flexíveis como condutoras de corrente elétrica, provocando um aquecimento e o consequente amolecimento do resíduo parafínico, para posterior aplicação de pressão para a expulsão da parafina. O método se revelou eficaz e foi patenteado pela PETROBRAS; atualmente é utilizado como padrão na Companhia para limpeza em terra de linhas obstruídas.

Com base nas operações efetuadas formou-se um conhecimento de como e quando alterar a potência elétrica aplicada, a partir de medidas de temperatura ao longo da linha, de forma a tornar mais eficiente o processo. Este controle de potência é feito de forma manual a partir da análise freqüente do perfil de temperaturas por parte do operador. Neste trabalho é apresentada uma análise da substituição da ação humana por um controle automático com a utilização da lógica *fuzzy*.

2 Aquecimento Elétrico

O uso de energia elétrica é a maneira mais apropriada de se obter o aquecimento necessário para solucionar o problema em questão. Para se utilizar um método de desobstrução devem ser levadas em conta algumas restrições: o bloqueio completo, as dimensões e peso muito grandes envolvidos (da ordem de dezenas de toneladas) e a impossibilidade de desenrolar a linha flexível de sua bobina por falta de espaço. Por motivos econômicos, não é possível levar a linha para local mais amplo, pois o único lugar existente no Brasil capaz de oferecer meios para o seu manuseio situa-se na fábrica junto à qual a PETROBRAS mantém o seu armazenamento. Assim, a operação é feita com a linha instalada em sua bobina de armazenamento (Figura 2).

Antes de se efetuar as conexões elétricas, a linha é preparada com a instalação de termopares ao longo de sua extensão. Estes sensores permitem acompanhar a evolução do perfil de temperaturas e alertam se algum ponto ultrapassa 90 °C. Também é efetuado um isolamento térmico em volta da bobina de armazenamento, pois foi verificado em simulação numérica que não se conseguiria o aquecimento adequado com a linha exposta ao meio ambiente. A fonte de energia consiste de um retificador capaz de fornecer 37 kW. O uso de corrente contínua é adotado por questões de segurança, pois a indutância é muito grande devido às dimensões do enrolamento; no caso de uso de corrente alternada, a tensão necessária para se obter a potência de aquecimento requerida seria muito alta, levando a grande risco de ocorrência de arcos elétricos. Esta possibilidade tem que ser afastada, uma vez que o fluido manuseado é inflamável. A potência aplicada por metro de linha deve ser baixa de forma a se obter uma distribuição de temperaturas mais homogênea. O resíduo sólido que bloqueia as tubulações só começa a amolecer a partir de aproximadamente 60 °C,

devendo ser esta a temperatura mínima a ser alcançada antes de se aplicar pressão. A previsão é de um tempo bem acima de 48 h para se atingir esta temperatura com potência em torno de 10 W/m em linhas de 4" com extensão média.



Figura 2 - Linha flexível em sua bobina de armazenamento.

No primeiro teste efetuado, foi aplicada uma potência de 14 W/m em uma linha de média extensão. Após 110 h de aquecimento, iniciou-se a pressurização até a pressão máxima de operação da linha, sem sucesso. Decidiu-se continuar a pressurização até o limite de teste hidrostático, 50% acima da pressão de operação, onde ocorreu a desobstrução, mas com violência (Figura 3).



Figura 3 - Desobstrução no primeiro teste

Pelo perfil de temperaturas deste teste, mostrado na Figura 4, observa-se uma diferença de quase 50°C entre a maior e a menor temperatura final. A região de baixa temperatura corresponde ao ponto onde se situa o bloqueio; a parafina sólida consome toda energia na mudança para a fase

líquida. As temperaturas a 0 e 1800 m são baixas porque são regiões com isolamento térmico deficiente. O mais importante é a obtenção de uma distribuição de temperaturas acima de 60 °C mais homogênea, pois, além de se garantir o amolecimento, o bloco de parafina pode parar quando atingir uma região muito fria. A homogeneidade de temperaturas não foi obtida mas pode ser alcançada desligando-se o retificador quando temperaturas altas forem atingidas em alguns pontos; a partir do momento do desligamento, a energia das regiões muito quentes é transferida para os locais de temperatura mais baixa, provocando uma equalização de temperaturas. Após alguns ciclos de desligamento e religamento da energia elétrica, um perfil de temperaturas mais homogêneo acima de 60 °C é alcançado. Este método é atualmente utilizado e possibilita uma desobstrução mais fácil e a pressões bem mais baixas do que as originariamente observadas, evitando-se a saída violenta de parafina.

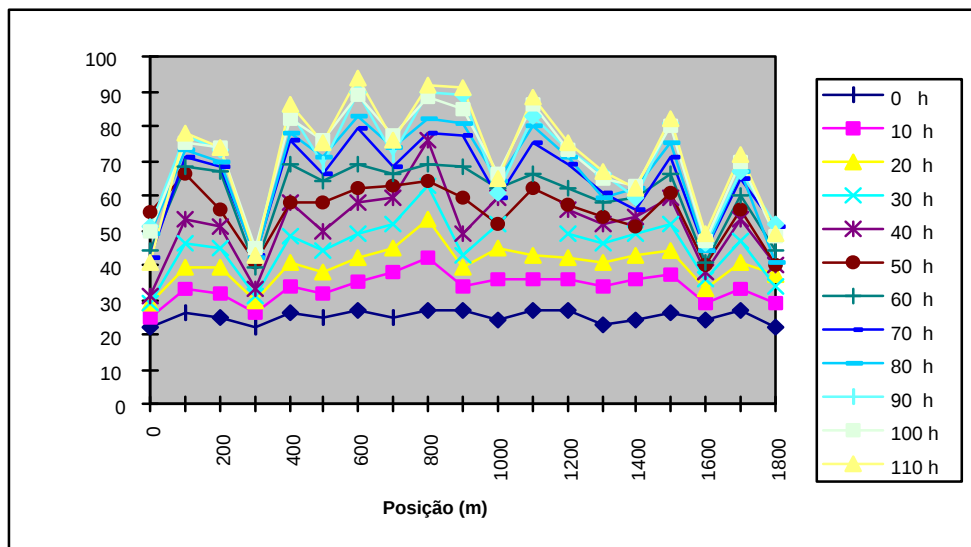


Figura 4 - Perfil de temperaturas do primeiro teste.

Devido a outros resultados obtidos na fase de testes, acredita-se que possa ocorrer a situação em que a linha é de pequena extensão, mas com resíduos de parafina uniformemente distribuídos. Neste caso, o perfil de temperaturas ao longo da linha se manterá mais homogêneo independentemente do controle humano. As baixas temperaturas a serem vencidas ocorrerão nas camadas interna e externa do enrolamento devido a falhas no isolamento térmico da bobina. Entretanto, as diferenças de temperaturas não serão muito altas.

3 Simulação Numérica

O processo de aquecimento da bobina de tubos flexíveis pode ser simulado com a resolução da equação da energia pelo método de diferenças finitas de Patankar [1], considerando-se uma geometria unidimensional. Esta simplificação pode ser considerada aceitável para os tubos localizados em seções próximas do centro da bobina, já que haverá um pequeno gradiente de temperatura na direção x devido à baixa condutividade do material e à grande distância entre os limites laterais da bobina. Na Figura 5 a bobina é apresentada esquematicamente, com os seus eixos de coordenadas.

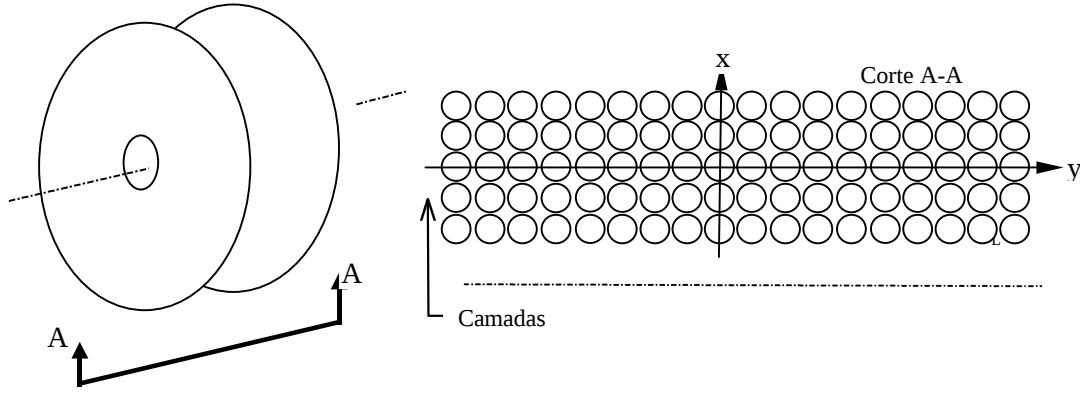


Figura 5 - Representação da bobina

Apesar da geometria radial, é razoável a adoção de coordenadas retangulares. Isto pode ser justificado devido à baixa razão entre o diâmetro externo e o diâmetro interno da bobina, o que permite uma aproximação de placa plana. Em coordenadas retangulares a equação da energia pode ser escrita como:

$$\tilde{n}C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K \frac{\partial T}{\partial x} \right) + S \quad (1)$$

Onde T representa a temperatura, t o tempo, x a distância, e S o termo fonte. As propriedades físicas são: a massa específica ρ , o calor específico C_p e a condutividade térmica do material K. Com o índice i representando a posição do ponto na malha, a equação (1) discretizada fica:

$$a_i \cdot T_i = a_{i+1} \cdot T_{i+1} + a_{i-1} \cdot T_{i-1} + a_i^0 \cdot T_i^0 + b \quad (2)$$

$$a_{i-1} = a_{i+1} = K/\Delta x, \quad b = S \Delta x, \quad a_i^0 = \tilde{n}C_p \Delta x / \Delta t, \quad a_i = a_{i-1} + a_{i+1} + a_i^0$$

São considerados os seguintes valores médios esperados das propriedades:

condutividade térmica	$K = 0,34 \text{ W/m } ^\circ\text{C}$
massa específica	$\rho = 2600 \text{ kg/m}^3$
calor específico	$C_p = 840 \text{ J/kg } ^\circ\text{C}$

As condições de contorno são dadas pelo fluxo de calor na parede (q_b):

$$q_b = h (T_\infty - T_b) \quad (3)$$

onde h é o coeficiente de película ou a resistência do isolamento térmico, T_∞ é a temperatura ambiente e T_b é a temperatura na extremidade.

O cálculo do conjunto das equações discretizadas pelo método de Gauss-Seidel permite analisar o comportamento do perfil de temperaturas das diversas situações encontradas na prática, embora seja muito difícil estimar os coeficientes de forma que o resultado seja exato. O gráfico da Figura 6 apresenta uma comparação entre os valores de temperaturas medidos para cada camada de tubo no primeiro teste e os valores calculados conforme exposto. Observa-se que, durante as primeiras 40 horas de operação, há uma boa concordância entre os dois resultados. A partir daí as diferenças se acentuam significativamente e a forma que os valores medidos assumem indicam que a condutividade térmica é maior do que a estimada e que há um local na camada 4 com uma boa

quantidade de parafina consumindo a energia térmica. A existência de pontos em que a energia térmica é consumida pela parafina pode ser simulada acrescentando-se um fator **f** no coeficiente **b** de (2), indicando o nível percentual da energia em cada nó utilizado para o aquecimento.

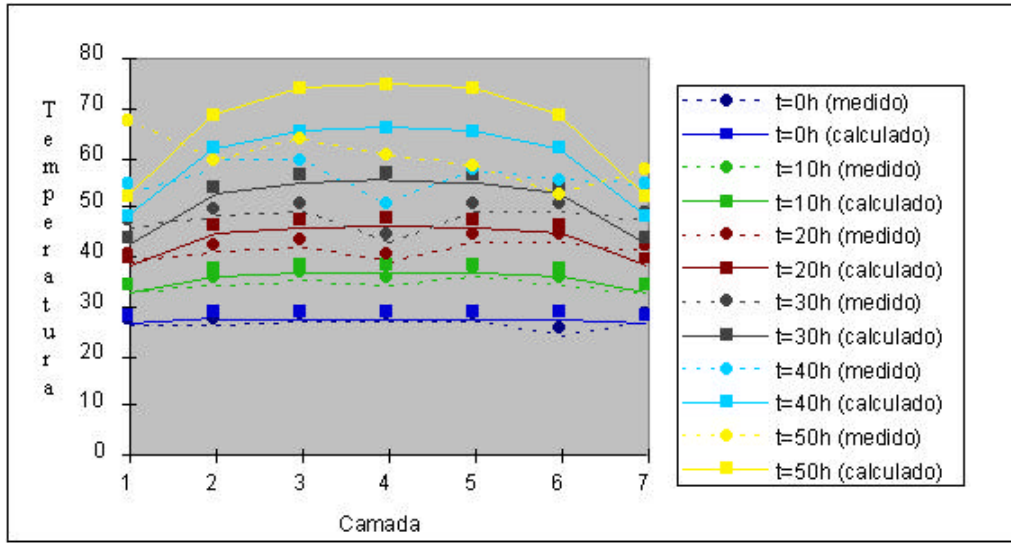


Figura 6 - Comparação entre os valores de temperatura (em °C) medidos no 1º teste e os calculados através de simulação numérica.

4 Lógica Fuzzy

Operadores humanos são capazes de controlar processos bastante complexos, baseados em informações imprecisas ou aproximadas a respeito desses processos. A estratégia de controle adotada pelos operadores humanos é também de natureza imprecisa e geralmente possível de ser expressa em termos linguísticos. A Teoria de Conjuntos *Fuzzy* e os conceitos de Lógica *Fuzzy* podem ser utilizados para traduzir em termos matemáticos a informação imprecisa expressa por um conjunto de regras linguísticas. Se um operador humano for capaz de articular sua estratégia de controle como um conjunto de regras da forma SE ENTÃO, um algoritmo passível de ser implementado em computador pode ser construído. O resultado é um controlador baseado em regras, no qual a Lógica *Fuzzy* fornece o ferramental matemático para se lidar com as tais regras linguísticas. É importante notar que, nesse tipo de controle, não é necessário se conhecer o modelo matemático do processo, o que se constitui em uma vantagem sobre outros procedimentos em que é fundamental a descrição matemática do sistema a controlar.

Conforme mencionado acima, a estratégia de controle consiste de um conjunto de frases linguísticas, ou regras, do tipo "SE temperatura é BAIXA ENTÃO potência é ALTA". Em termos gerais, considere, por exemplo, o caso em que cada regra de controle relaciona duas variáveis de entrada **e** e **ce** à saída do controlador **u**, e um algoritmo de controle consistindo de um conjunto de regras $R^1, R^2, \dots, R^n$, da forma SE ($E \text{ é } E^j$) E ($CE \text{ é } CE^j$) ENTÃO ($U \text{ é } U^j$), conectadas através de um conectivo OU [2]. A combinação dessas regras pode ser expressa matematicamente (por sua função de pertinência) como:

$$\hat{i}_{R^n}(e, ce, u) = f_1[\hat{i}_{R^1}(e, ce, u), \dots, \hat{i}_{R^n}(e, ce, u)] \quad (4)$$

onde f_1 expressa o conectivo OU. Em (4) acima, cada regra de controle j pode ser expressa como

$$\hat{i}_{R^j}(e, ce, u) = f_2[f_3(\hat{i}_{E^j}(e), \hat{i}_{CE^j}(ce)), \hat{i}_{U^j}(u)] \quad (5)$$

Em (5), $E = \{e\}$, $CE = \{ce\}$, $U = \{u\}$ são universos finitos das variáveis **e**, **ce** e **u**, e E^j , CE^j e U^j são subconjuntos *fuzzy* desses universos. O operador f_2 representa a implicação [3], e f_3 é a interpretação do conectivo E, usualmente o operador *min* ($\wedge$). O controlador decide que ação tomar através de uma regra de inferência composicional, inspirada no *Modus Ponens* da lógica proposicional. Geralmente, as entradas do controlador são valores reais precisos, e denominados aqui e_s e ce_s . O conjunto *fuzzy* U_s da saída do controlador será, então, dado por:

$$\hat{u}_{U_s}(u) = f_1[f_2(\hat{u}_{E^1}(e_s) \wedge \hat{u}_{CE^1}(ce_s), \hat{u}_{U^1}(u)), \dots, f_2(\hat{u}_{E^n}(e_s) \wedge \hat{u}_{CE^n}(ce_s), \hat{u}_{U^n}(u))]$$

Como o processo sendo controlado requer, em sua entrada, valores não-*fuzzy*, o conjunto *fuzzy* da saída do controlador deve ser *defuzzificado*; para isto, utiliza-se um método de *defuzzificação*, gerando-se, em consequência, um valor não-*fuzzy* u_s .

5 Aplicação da Lógica Fuzzy

O conhecimento sobre o comportamento do aquecimento, adquirido com as desparafinações já efetuadas, permite que o operador tome decisões, em tempo real, de modo a tornar o processo mais eficiente. Um dos métodos consiste da retirada da potência aplicada por metro de linha de forma a permitir uma distribuição mais uniforme de temperaturas abaixo de 90 °C. Entretanto, o momento de se desligar o retificador não é bem definido porque cada operação apresenta características únicas. As decisões humanas são tomadas a partir de uma análise da temperatura máxima existente e da homogeneidade da distribuição das temperaturas ao longo da linha. O raciocínio pode ser resumido na seguinte frase: "a maior temperatura existente já está em 85 °C, i.é., está razoavelmente alta; a diferença entre a máxima e a mínima temperaturas é da ordem de 40 °C; assim, é melhor diminuir muito a potência para não danificar a linha e, simultaneamente, transferir rapidamente energia térmica para a região bloqueada". Esta forma de pensar caracteriza bem a possibilidade de se utilizar lógica *fuzzy* para o controle automático.

Para se verificar a eficiência do uso da lógica *fuzzy* no processo descrito implementou-se o controle com o auxílio do MATLAB[®]. O sistema implementado para o controle automático de desobstrução de linhas flexíveis é composto de duas variáveis de entrada – a temperatura máxima (**Tmax**) e a diferença entre as temperaturas máxima e mínima encontradas na linha (**T**) – e de uma variável de saída – potência por metro (**Potência**). A partir dos termos linguísticos (*baixa*, *média* e *alta*) criados para cada variável, foram especificadas regras linguísticas que traduzissem a estratégia de controle do operador humano. Para a escolha das regras foi levado em conta que com temperaturas altas a **Potência** deve ser baixa em qualquer situação, pois não se deseja que **Tmax** aumente a ponto de danificar a linha. Em temperaturas baixas é de interesse aplicar **Potência** máxima de forma a acelerar o aquecimento no momento em que não há risco de **Tmax** ultrapassar 90 °C. A situação de médias temperaturas apresenta um potencial para aumento da eficiência do processo. Valores de **Tmax** médios e **T** baixos indicam um aquecimento uniforme que se manterá até a temperatura máxima atingir 90 °C; a **Potência** pode ser alta para acelerar o processo. Valores de **Tmax** médios e **T** altos indicam pontos muito bloqueados absorvendo calor; é hora de conter **Tmax** e transferir calor dos locais de temperatura alta para as regiões bloqueadas com aplicação de **Potência** mais baixa. O conjunto de regras resultante é:

SE (Tmax é baixa)		ENTÃO (Potência é alta)
SE (Tmax é média)	E (T é baixa)	ENTÃO (Potência é alta)
SE (Tmax é média)	E (T é alta)	ENTÃO (Potência é média)
SE (Tmax é alta)		ENTÃO (Potência é baixa)

Os conjuntos *fuzzy* definitivos são apresentados nas Figuras 7, 8 e 9. Após a análise de diversos resultados, estes conjuntos foram os que proporcionaram as melhores respostas. Foram utilizados os operadores *min* para implicação (f_2) e *max* para representar o conectivo OU (f_1); o método do *centróide* foi utilizado para *defuzzificação* do conjunto *fuzzy* de saída.

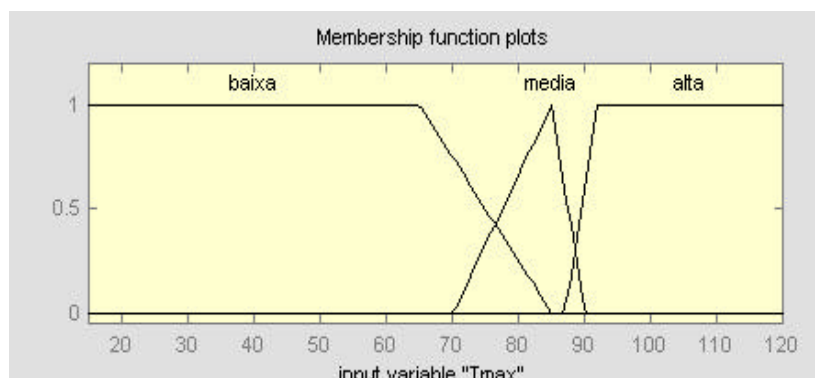


Figura 7 - Conjuntos *fuzzy* para a variável de entrada **Tmax**

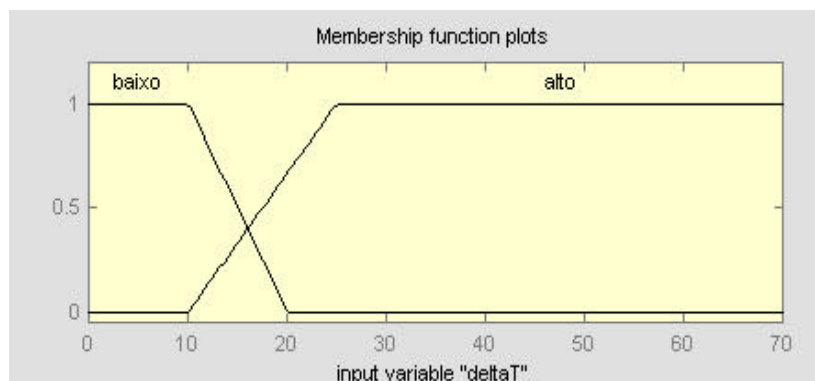


Figura 8- Conjuntos *fuzzy* para a variável de entrada **T**

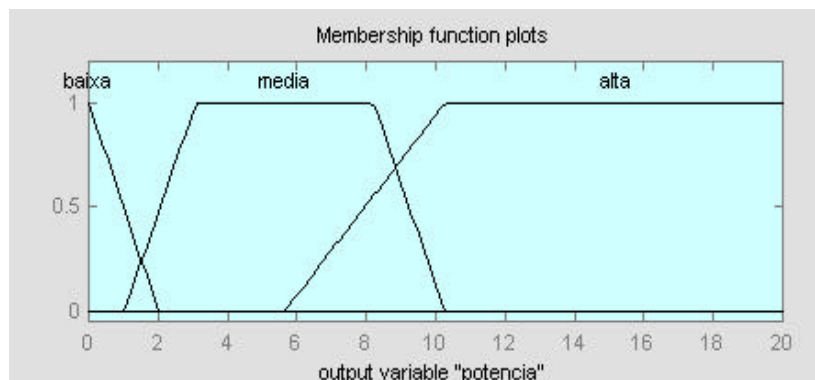


Figura 9 - Conjuntos *fuzzy* para a variável de saída **Potência**

6 Resultados Experimentais

Para a análise do controle são apresentadas duas situações: uma correspondente ao primeiro teste já descrito, e outra correspondendo ao caso de uma linha de pequenas dimensões e distribuição uniforme de parafina em seu interior.

Na primeira situação atinge-se a meta em 98 horas; a Figura 10, mostra uma comparação entre as temperaturas obtidas com o controle *fuzzy* e o controle manual. Os nós 1, 2, 19 e 20 estão abaixo de 60 °C porque o isolamento térmico da bobina nunca é eficiente. Estes nós correspondem às camadas externas e dificilmente atingem 60 °C utilizando o método da variação da potência. Entretanto, os níveis de temperatura alcançados permitem a limpeza. Quando a temperatura máxima atinge 90 °C, em 50 h, a potência aplicada constante (controle manual) passa de 14 W/m para 0 W/m. Os resultados com controle automático (potência *fuzzy*) coincidem com os resultados do controle manual. A pressurização não é feita assim que se atinge 60 °C; espera-se ainda um tempo para que uma boa quantidade de parafina amoleça. Na Figura 11 apresenta-se o resultado da continuação do aquecimento até 161 h. Até se atingir este tempo, o retificador fez mais um ciclo de ligar e desligar para que a temperatura máxima não ultrapassasse o limite da linha flexível (90°C). Os dois perfis de temperatura continuam muito semelhantes.

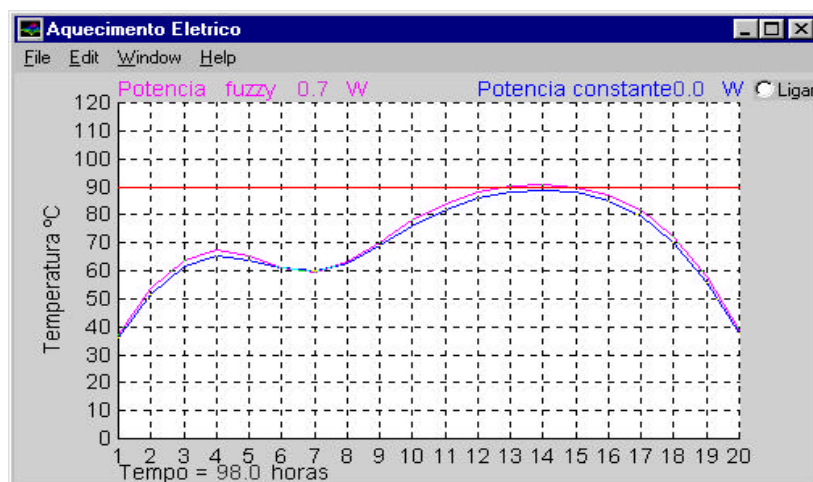


Figura 10 - Temperatura x Nó após 98 horas.

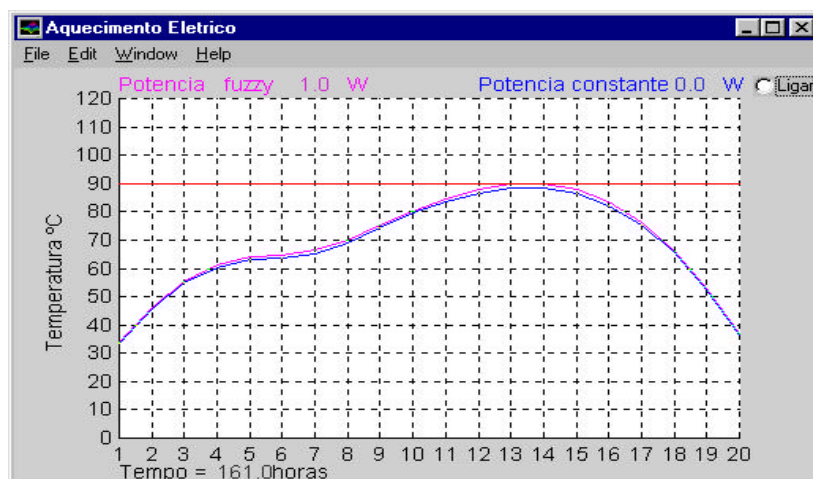


Figura 11 - Temperatura x Nó após 161 horas.

Na segunda situação a meta foi atingida em 50 horas (Figura 12). As curvas são bastante semelhantes novamente. Para tempos acima de 50 horas a curva do controle *fuzzy* mantém-se estável, enquanto o controle manual dispara até atingir uma temperatura máxima de 90 °C.

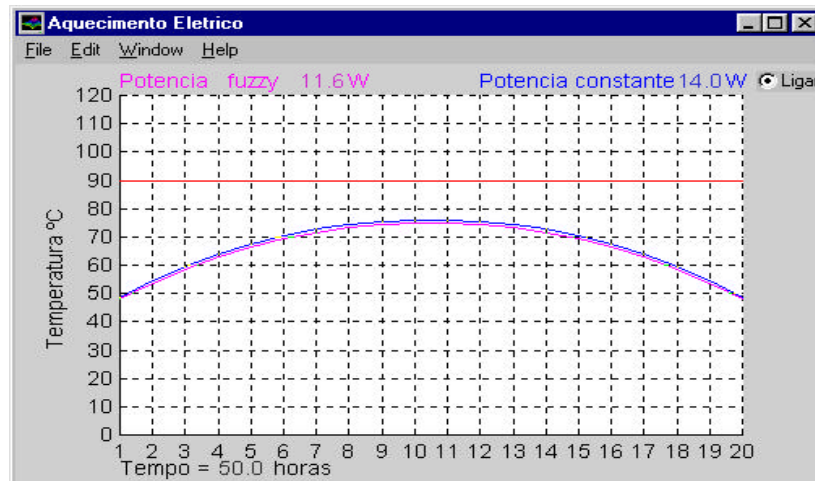


Figura 12 - Temperatura x Nó após 50 horas.

7 Conclusões

Os resultados obtidos indicam que é perfeitamente possível utilizar a lógica *fuzzy* para automatizar, no aquecimento elétrico de linhas flexíveis, as ações de operadores humanos. A análise foi feita com auxílio de simulação numérica utilizando a equação da energia, que demonstrou boa concordância de comportamento em relação ao problema real. A partir de conhecimentos sobre o aquecimento, chegou-se à definição de um sistema *fuzzy* que, comparado com o controle humano, apresentou o mesmo efeito nas temperaturas finais. O controle automático permitiu que as temperaturas alcançassem o patamar mínimo desejado sem que a temperatura máxima ultrapassasse os limites das linhas.

7 Referências Bibliográficas

- [1] Patankar, S. V., *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, Hemisphere, 1980.
- [2] Lembessis, E., Tanscheit, R., *The influence of implication operators and defuzzification methods on the deterministic output of a fuzzy rule-based controller*, Proceedings of the IV IFSA Congress, pp. 109-114, Belgium, 1991.
- [3] Mendel, J. M., *Fuzzy Logic Systems for Engineering: a Tutorial*, Proceedings of the IEEE, vol. 83, No. 3, March, 1995.