

Sistema Adaptativo de Decisão em Aplicações Espaciais Vácuo-Térmicas

J. E. Araujo
ernesto@lit.inpe.br

Laboratório de Integração e Testes
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
12.227-010 – São José Campos – SP

Sandra A. Sandri
sandri@lac.inpe.br

Laboratório Associado de Ciência da
Computação e Matemática Aplicada
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
12.227-010 – São José Campos – SP

Karl H. Kientiz
kientizt@ita.cta.br

Departamento de Engenharia Eletrônica
Instituto Tecnológico de Aeronáutica
Praça Marechal Eduardo Gomes, 50
São José dos Campos – São Paulo

Resumo

Uma nova abordagem de sistemas de decisão adaptativa aplicada ao controle de uma unidade termo-vácuo de simulação ambiental para qualificação de sistemas espaciais é proposta neste artigo. O sistema de decisão emprega a estrutura conceitual de decisão nebulosa e o conceito de raciocínio aproximado através da regra composicional de referência. O mecanismo empregado no processo de decisão autônomo é influenciado pelo objetivo (referência) que se deseja alcançar e reflete as preferências do responsável pelo processo decisório. Este trabalho foi motivado por três objetivos: (i) emular paradigmas e processos da mente humana que incorporem as preferências e habilidades pessoais para decisão, (ii) demonstrar a capacidade de sistemas de decisão e controle nebuloso para lidar com problemas do mundo real, (iii) solucionar problemas críticos de desenvolvimento de sistemas de aplicação espacial.

1. Introdução

Uma vez no espaço, satélites e dispositivos espaciais estão expostos, por exemplo, à incidência de luz solar, radiação de Albedo, radiação terrestre, condições de sombra/eclipse, radiação infra-vermelha [6]. Durante o processo de qualificação espacial, câmaras de testes termo-vácuo são utilizadas para reproduzir as condições ambientais esperadas após o lançamento. Satélites e dispositivos espaciais não idênticos (Figura 1) produzem diferentes comportamentos térmicos pela influência de diversos fatores, tais como, coeficiente de absorção de radiação, capacidade térmica, massa e área de superfície [8]. Como cada dispositivo a ser testado é diferente um do outro, cada resposta térmica apresenta comportamento dinâmico distinto. Esta característica é ainda mais significativa quando se considera o conjunto composto pela câmara de teste e pelo espécime. As características não-lineares da câmara somadas a cada espécime em teste fazem com que o sistema total seja variante no tempo. Além disto, o sistema apresenta atraso de resposta. Portanto, a tarefa de modelar a câmara e o

espécime a cada teste para, em seguida, empregar o modelo matemático resultante no projeto do controlador é complexa para uma descrição através de equações diferenciais. Tal controlador, deve lidar ainda com características não-lineares definidas sobre uma variedade de pontos de operação determinado pelos valores de temperatura de referência (*set point*) estabelecidos para os testes. Devido a estas configurações singulares do sistema de teste termo-vácuo, a tarefa de projetar sistemas de controle automático que mantêm a temperatura do espécime a ser testado próxima dos valores de referência é difícil. O problema é saber, portanto, qual abordagem melhor controla o processo total diante desta dinâmica de comportamento.

Quando se considera dispositivos espaciais e, particularmente, os satélites – um tipo de espécime sensível e crítico – , manter a temperatura próxima dos valores de referência e evitar sobre-sinais nas temperaturas limítrofes superiores e inferiores é uma atividade usualmente executada por operadores especializados. A fim de determinar as ações necessárias para interferir sobre sistema, de modo a atingir um determinado objetivo (desempenho); a capacidade humana de julgamento, de percepção dos padrões e regularidades, e mesmo as emoções, assumem um papel



Figura 1 – Diferentes sistemas espaciais durante a etapa de qualificação : teste termo-vácuo

importante para se compreender as regras (a razão) que governam os processos que são difíceis de se modelar matematicamente.

Criar mecanismos e estruturas autônomas que possuam a habilidade de decidir e que emulem o raciocínio humano é um importante objetivo que tem sido perseguido em diversas áreas [4][5][9][12]. Uma alternativa para um processo de decisão que modele o raciocínio humano e que conduza a um certo grau de autonomia em sistemas de decisão é empregar a teoria de conjuntos e lógica nebulosa [17]. Um sistema de decisão nebulosa é uma estrutura que incorpora a experiência humana e baseia-se na teoria de sistemas nebulosos; uma estrutura conceitual flexível o suficiente para lidar inclusive com aspectos de sistemas humanísticos [18]. Sistemas nebulosos aplicados a processos de decisão são usados para avaliar alternativas de ações de forma a refletir tanto quanto possível as preferências do responsável pelo processo decisório [13]. Esta técnica é uma representação formal matemática para expressões lingüísticas e raciocínio aproximado empregados pelo ser humano no tratamento de informações na presença de incerteza.

Neste artigo, é empregado um mecanismo de decisão adaptativa que é capaz de lidar com alterações no objetivo (referência) ou restrição [1] para descrever como um controlador automático pode substituir operadores experientes durante o teste termo-vácuo. Este processo de decisão nebulosa adaptativa que se modifica para satisfazer o objetivo a ser alcançado é visto como uma forma de representar o *pensamento adaptativo humano* [7]. Ele pode operar em ambientes onde as informações são conhecidas de maneira imprecisa (vaga) e que são capazes de lidar com interferências externas, tais como modificações no ambiente ou no contexto no qual se está inserido [1]. Esta nova abordagem emprega a estrutura conceitual de decisão em ambientes nebulosos sugerida por Bellman e Zadeh e o conceito de raciocínio aproximado através da regra composicional de inferência. Nesta proposição, a base de regras que compõe o conceito de raciocínio aproximado incorpora a experiência dos operadores especialistas em conduzir apropriadamente os testes de qualificação espacial. Adotando-se o conceito de controle adaptativo baseado no escalonamento de ganhos (*gain-scheduling*) [3] é possível compensar as mudanças de comportamento térmico causadas pela introdução de distintas cargas em cada teste e pela dependência das condições de operação em função dos diferentes patamares de temperatura desejado para qualificação. Esta abordagem híbrida entre um sistema de decisão nebuloso e o conceito de escalonamento de ganho encontrado na teoria de controle permite modificar os parâmetros que definem o processo decisório considerando-se o comportamento dinâmico dos espécimes individuais que estão em teste.

2. Sistemas de Decisão Nebuloso Adaptativo direcionado pelo Objetivo

Na estrutura conceitual de decisão nebulosa sugerida por Bellman e Zadeh, os objetivos e restrições são representados por conjuntos nebulosos. Da mesma forma, a decisão – que deve satisfazer simultaneamente objetivo e restrição – é também um conjunto nebuloso. Visto que os elementos de decisão devem satisfazer a dois conjuntos simultaneamente, e o menor dos dois graus de pertinência deve ser escolhido, a operação de *mínimo* é usualmente empregada [11]. A operação de mínimo entre os conjuntos corresponde ao operador de conjunção que, por sua vez, está relacionado ao conectivo lógico de interseção. Desta forma, o processo de decisão no ambiente nebuloso pode ser definido pela operação de interseção, \cap , empregada para manipular os conjuntos objetivo e restrição. Assim, se o objetivo representado por um conjunto nebuloso, G , e a restrição nebulosa, C , em um espaço de alternativas X , então a decisão, D , é formada pela conjunção de G e C (1). Este processo de decisão pode ser visualizado através da Figura 2, se for considerado, por exemplo, que o espaço de alternativa for o mesmo para o objetivo e a restrição. Uma outra forma de restrição existente esta associada a uma informação relacionada a uma percepção (ou medida) do funcionamento do sistema real que irá afetar o processo de decisão (Figura 3).

$$D = G \cap C \quad (1)$$

$$D = G(K) \cap C(K) \quad (2)$$

$$D = G[K(r)] \cap C[K(r)]. \quad (3)$$

O conceito associado à teoria de decisão em (1) foi, inicialmente, proposto para lidar com condições de decisão invariáveis e pode ser aplicado a uma grande classe de problemas de decisão. Neste caso, o objetivo e a restrição são constantes e não representam explicitamente o conhecimento utilizado para definir as funções de pertinência que os representam. Para acomodar o conhecimento, K , utilizado para determinação dos objetivos e das restrições que estão implicitamente relacionados com a escolha das funções de pertinência, a equação (1) pode ser reescrita (2). Mais realista, esta representação ainda é incompleta por não incorporar possíveis modificações causadas por novas informações (fatores externos) que podem afetar a decisão. Quando tais modificação existem, a forma das funções de pertinência relacionadas com o objetivo e a restrição produzem outras áreas associadas ao processo de decisão que deveriam ser representadas também. Assim, se o objetivo ou restrição é modificada de acordo com o ambiente (contexto), estas fontes externas devem ser explicitamente descritas. Uma alternativa (3) para se



Figura 2 - Decisão tradicional em ambiente nebuloso



Figura 3 - Decisão tradicional em ambiente nebuloso com restrição de medida/percepção

incorporar estas fontes de novas informações (novas referências, r) no conhecimento, agora $K(r)$, é sugerida em [1]. A decisão, agora, pode ser entendida como uma maneira adaptativa de decidir quando um fator externo com capacidade de interferir no processo decisório é adicionado ao objetivo ou à restrição.

Esta nova abordagem tenta compensar a desvantagem do procedimento de decisão original em ambientes nebulosos onde os objetivos e restrições são fixas e independente do contexto (dado de medida, entrada externa etc.). Assim como no processo de decisão tradicional, este processo de decisão adaptativo em ambientes nebulosos pode ser visualizado na Figura 4 e na Figura 5. Esta última pode representar, inclusive, modificadores lingüísticos nebulosos aos se empregar o princípio do englobamento semântico presente na teoria de raciocínio aproximado [14]. As diferentes áreas correspondem a cada nova possibilidade de decisão em consequência de alterações das informações externas.

O cálculo das restrições na teoria de sistemas nebulosos é extremamente importante porque pode estar relacionada com a cognição humana, particularmente em situações que envolvem formação de conceitos, reconhecimento de padrões (que descrevem a natureza ou sistemas específicos), e processo de decisão em ambientes nebulosos ou com presença de incertezas [15]. Entende-se por *restrição nebulosa* uma relação nebulosa que atua como uma restrição elástica sobre os valores possíveis que uma variável pode assumir. Um dos papéis mais importantes atribuídos ao cálculo de restrição

nebulosa é fornecer uma base conceitual para a lógica nebulosa construir um tipo de raciocínio que não é nem muito exato, nem muito inexato. Conhecido como *raciocínio aproximado*, ele assume um papel básico no processo humano de decisão [15], principalmente se considerar-se que o raciocínio humano é aproximado por natureza [16].

O raciocínio aproximado, ou nebuloso, é aquele em que uma conclusão imprecisa possível é deduzida de uma coleção de premissas imprecisas [14]. Para tanto, este mecanismo assume (i) que na mente humana os valores-verdade são expressos em termos lingüísticos e são representados através de conjuntos nebulosos; (ii) que existem tabelas verdades capazes de lidar com termos nebulosos (imprecisos); (iii) que existem regras de inferência que produzem conclusões aproximadas, ao invés de exatas; e (iv) que as premissas presentes na regra de inferência (silogismo) são proposições nebulosas representadas por conjuntos nebulosos. Neste contexto, a lógica nebulosa é vista como a lógica empregada para descrever o raciocínio aproximado humano.

As regras principais da inferência na lógica nebulosa que compõem a teoria de raciocínio aproximado são o princípio da projeção; o princípio da conjunção; e o princípio da englobamento semântico. Estes princípios compõem a regra composicional de inferência que pode representar o mecanismo de raciocínio “*modus ponens*” generalizado. Este mecanismo de inferência é composto pelo conjunto de regras do tipo SE <premissa> ENTÃO <conclusão>, equivalente às proposições lingüísticas do processo de decisão em um ambiente nebuloso, ele pode

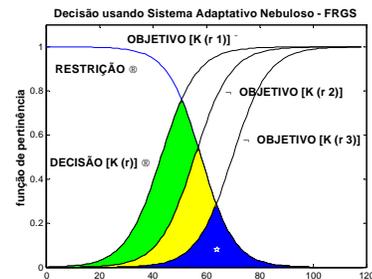


Figura 4 - Decisão adaptativa em ambientes nebuloso (funções diferentes para os objetivos)

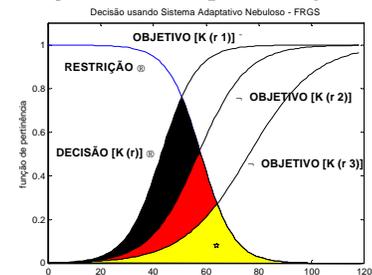


Figura 5 - Decisão adaptativa em ambiente nebuloso (mesma função, parâmetros diferentes)

ser humano. Se este conjunto de regras existe no ser representado como uma *relação nebulosa*, R . Dois exemplos destes conceitos são mostrados na Figura 6 e Figura 7. Embora tenha resultados diferentes, o mesmo conjunto de regras foi empregado:

SE erro = *Pequeno* ENTÃO ação = *Pequena*
 SE erro = *Médio* ENTÃO ação = *Médio* (4)
 SE erro = *Grande* ENTÃO ação = *Grande*

Os respectivos gráficos (a) representam a formação do conhecimento e está relacionado com a experiência individual. Apesar do conjunto de regras ser o mesmo, uma observação mais acurada revela uma diferença da relação nebulosa. Estas duas relações distintas foram obtidas ao se introduzir uma pequena modificação na definição do suporte e do núcleo das funções de pertinência. Os gráficos (b) apresentam a percepção (ou medida) relativa à informação que define o comportamento real do sistema e que irá afetar a decisão final (g). Os gráficos (c) correspondem à extensão cilíndrica da percepção, ou medida, sobre a base de conhecimento (a). Os gráficos (d) revelam o princípio da conjunção. Os gráficos (e) e (f), mostram o princípio da projeção e a projeção resultante. Se uma restrição adicional for introduzida, uma outra área de decisão ainda mais limitada será determinada. Embora visualmente diferente da Figura 2, conceitualmente são iguais; tem-se em (g) áreas resultantes da interseção entre duas funções: objetivo e restrição. As diferentes áreas são causadas pela modificação das funções de pertinência que compõem a base de conhecimento. Como proposto em [1], a mudança de comportamento no processo decisório pode ser resultado da influência de uma fonte externa, quando se incorpora novas informações (novas referências, r) fornecidas pelo ambiente (contexto). A modificação da base de conhecimento tipifica explicitamente a relação nebulosa resultante de regras nebulosas que descreve os princípios e fornece o suporte para o conhecimento empregado no processo de controle. Esta nova abordagem usada em problemas de decisão (controle) permite uma aproximação do pensamento adaptativo humano para lidar com ambientes (sistemas) complexos e não-lineares. Esta metodologia pode substituir o ser humano na tarefa de modificar (controlar) sistemas a fim de obter resultados mais seguros, mais eficientes, com maior qualidade e com menor custo. Em particular, esta técnica tem sido investigada para substituir especialistas na tarefa de operar um processo de teste termo-vácuo para qualificação de satélites e dispositivos espaciais.

3. Decisão e controle em sistema termo-vácuo

Um sistema de teste termo-vácuo consiste de uma

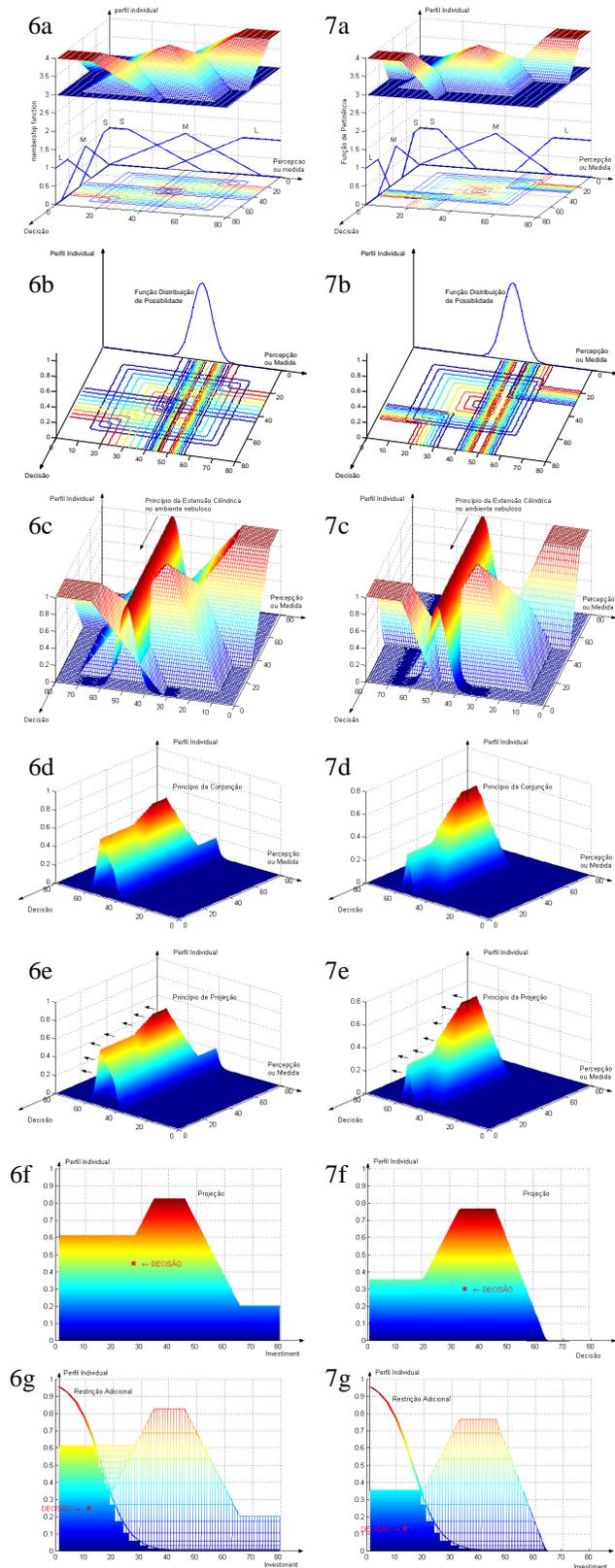


Figura 6 – Exemplo 1

Figura 7 - Exemplo 2

Regra composicional de inferência

câmara, um conjunto de tubos utilizado para transmitir calor e frio por radiação e alguns dispositivos auxiliares (Figura 8). Durante seu funcionamento, primeiro o vácuo é estabelecido no interior da câmara para simular esta condição ambiental presente no espaço ao qual os sistemas espaciais estão expostos. Em seguida a temperatura interna aos tubos é modificada para simular os ciclos térmicos causados pela incidência e ausência de luz solar. Para resfriar a câmara, nitrogênio líquido é pulverizado e transformado em gás no interior do conjunto de tubos. Para aquecer, resistências montadas no interior do conjunto de tubos fornecem calor ao gás que, por radiação, aquecem o espécime [10].

Este sistema é não-linear [8], apresenta atraso de resposta, e é variante no tempo – principalmente pela introdução de diferentes espécimes a cada teste. Além disto, existem diversas condições operacionais definidas pelos vários níveis de temperatura de referência (*set points*) utilizados durante o teste. A Figura 9 mostra o comportamento dinâmico térmico para a câmara em funcionamento nominal (a vazia). A Figura 10 corresponde a resposta térmica com uma carga passiva. Uma análise revela que o conjunto câmara-espécime apresentam diferentes taxas de aquecimento e resfriamento. As características mencionadas sugerem que controladores convencionais não são apropriados e que a modelagem matemática do sistema é complexa.

Para manter a temperatura próxima dos valores de referência e evitar sobre-sinais nas temperaturas, atualmente a câmara é controlada por seres humanos (Figura 11). Uma das alternativas para tornar a operação do sistema autônoma e evitar falhas humanas é criar um mecanismo capaz de emular o processo de decisão e o raciocínio humano utilizado pelos operadores ao mesmo tempo que técnicas de controle por realimentação devem ser consideradas. O uso da regra composicional de inferência permite tratar o processo de decisão e controle aproximadamente iguais. Ela assume um papel importante para fazer inferência tanto para mecanismos de decisão relacionados com a abordagem de raciocínio aproximado, quanto para sistemas de controle em

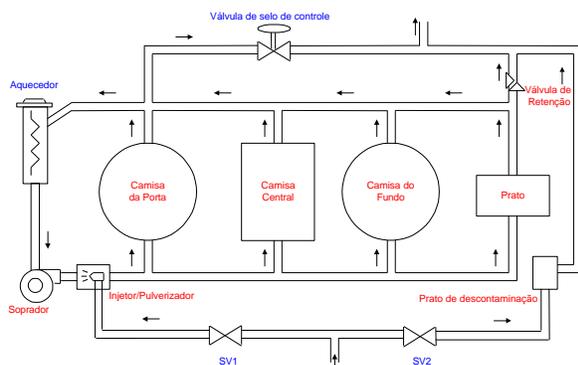


Figura 8 - Câmara de teste termo-vácuo

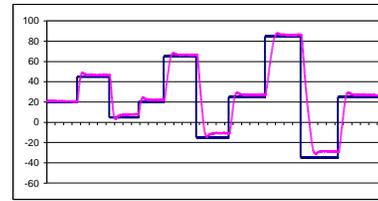


Figura 9 – Resposta térmica: Funcionamento nominal

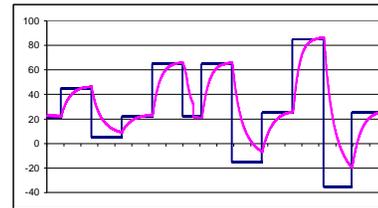


Figura 10 – Resposta térmica: Carga passiva

ambientes nebulosos [11]. Os benefícios de se empregar a regra de inferência é que sistemas nebulosos permitem controlar sistemas sem qualquer modelo matemático.

Empregando o princípio da projeção; o princípio da conjunção; e o princípio da englobamento, a regra composicional de inferência (5) faz uma composição entre a medida do estado atual do sistema, M , e a relação nebulosa que representa o conhecimento que se tem sobre o sistema, R . O resultado é o sinal de controle, U , necessário para obter a ação de controle para atingir um determinado objetivo (desempenho). A relação nebulosa é formada por um conjunto de regras que está associado à experiência de um especialista. Desta forma, deve ser incorporado em (5) o conhecimento, K , que foi utilizado para compor a lei de controle (6). Se parte do objetivo é definido durante a operação – e.g., problema de rastreamento ou problema de resposta degrau – uma entrada externa (referência, r) também deve ser incluída na representação da regra composicional de inferência (7). Quando esta referência externa existe, ela é associada com o objetivo de um sistema de controle. Além de exemplificar o processo de decisão em um ambiente nebuloso, a Figura 6 e a Figura 7 ilustraram também o funcionamento de um controlador nebuloso adaptativo que modifica suas funções de pertinência de acordo com variações de um fator externo, neste caso, a referência. Um controlador que assume tais propriedades dinâmicas ajusta seus

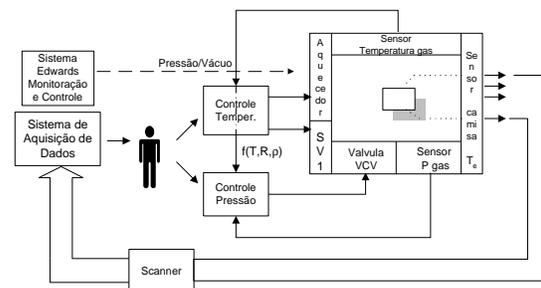


Figura 11 – Sistema de controle termo-vácuo atual

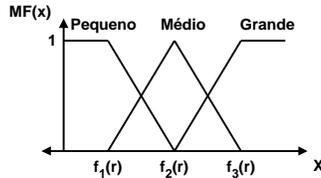


Figura 12 – Função de pertinência alterada pela referência

parâmetros de controle em função da referência de forma adaptativa. Os benefícios de aplicar este tipo de controlador é sua habilidade de controlar sistemas não-lineares sem qualquer modelo matemático, ao mesmo tempo que incorpora as características intrínsecas e dinâmicas dos sistemas não-lineares cujo comportamento dinâmico é função de entradas externas.

$$U = R \circ M = \text{projecção}[\text{conjunção}(R, M)] \quad (5)$$

$$U = R(K) \circ M \quad (6)$$

$$U = R[K(r)] \circ M \quad (7)$$

Visto que a operação da câmara deve considerar vários níveis de temperatura de referência (*set points*), este tipo de controlador pode emular o comportamento do operador que tem que considerar diferentes pontos de operação determinados pelas características não-lineares do sistema termo-vácuo. Este controlador foi aplicado no sistema de teste termo-vácuo no Laboratório de Integração e Testes (LIT/INPE). Nesta aplicação o núcleo e o suporte das funções de pertinência foram modificadas em função da temperatura desejada (Figura 12). Uma visão detalhada desta abordagem pode ser obtida em [2]. A resposta dinâmica relacionada sinal degrau de entrada é apresentada na Figura 13.

5. Conclusão

Os resultados mostram que esta abordagem é adequada para ser utilizada em sistemas de teste termo-vácuo, aumentando a qualidade dos testes e reduzindo custos. O procedimento proposto, permite atingir os valores de referência mais precisamente, e economizar nitrogênio líquido usado pelo sistema de resfriamento e energia dissipada pelas resistências de aquecimento. Vale enfatizar que a abordagem descrita neste artigo para o processo de decisão (controle) é um conceito geral e

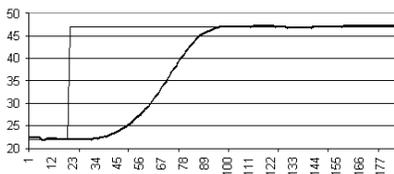


Figura 13 - Resposta transiente para um sinal de excitação

pode ser usada com sucesso em outras aplicações de sistemas espaciais possivelmente com o objetivo de melhorar ainda outros requisitos, tais como segurança e confiabilidade. Futuros desenvolvimentos incluem o uso de técnicas de sistemas inteligentes, tais como algoritmos genéticos ou redes neurais artificiais para, eficientemente, sintonizar as funções de pertinência ou gerar regras ainda mais apropriadas, tarefas que consomem tempo e recursos.

6. Referências

- [1] Araujo Filho, J.E., E Kienitz, K.H. - "Adaptive reference-driven decision-making process", *In: Proc. FUZZ-IEEE*, v.1, pp.452-457, St. Louis, 2003.
- [2] Araujo Filho, J.E., Sandri, S.A E Macau, E.E.N. - "A New Class Of Adaptive Fuzzy Control System applied in Industrial Thermal Vacuum Process", *In: Proc. 8th IEEE-ETFA*, v.1, pp. 426-431, France, 2001.
- [3] Åstrom, K.J. and Wittenmark, B., "Adaptive Control", Ed. Addison-Wesley, 1989.
- [4] Belman, R.E., Zadeh, L.A., "Decision-Making in a Fuzzy Environment", *Manage Sci*, v.17, n.4, pp. 141-164, 1970.
- [5] Edmonds, B., "The Constructibility of Artificial Intelligence (as Defined by the Turing Test)", *J. of Logic, Language and Information*, v.9, n.4, pp. 419-424, 2000.
- [6] Garner, J. T., "Satellite Control – A Comprehensive Approach", New edition, John Wiley & Sons Ltd. and Praxis Publishing Ltd., Chichester, 1996, 178 p.
- [7] Gigerenzer, G., "Adaptive Thinking", Oxford Ed., 2000.
- [8] Gilmore, D.G. , "Satellite Thermal Control Handbook", The Aerospace Corporation Press, California, 1994.
- [9] Harnard, S., "Minds, Machines and Turing", *J. of Logic, Language and Information*, v.9, n.4, pp. 425-445, 2000.
- [10] High Vacuum Systems Inc., *Operations and Maintenance Manual, Thermal Vacuum System with Thermally Conditioned Platen for Brazilian Space Research Institute*, 01 October, 1987.
- [11] Silva, C.W. de, "Intelligent Control: Fuzzy Logic Applications", CRC Press Ed., 1995, 343 p.
- [12] Rapaport, W.J., "How to Pass a Turing Test", *J. of Logic, Language and Information*, v.9, n.4, pp. 467-490, 2000.
- [13] Yager, R.R. "Fuzzy Modeling for Intelligent Decision Making under Uncertainty", *IEEE Trans. Syst. Man. Cyb. Part B*, v.30, n.1, pp. 60-70, 2000.
- [14] Zadeh, L.A., "A Theory of Approximate Reasoning", *In: Machine Intelligence*, in: v.9, (Haynes, J.E., Michie, D., Mikulich, L.I., eds.), U.K.: Ellis Horwood Limited, pp. 149-194, 1979.
- [15] Zadeh, L.A., "Calculus of Fuzzy Restrictions", *Ed. Zadeh et al. (Fuzzy Sets and their Applications to Cognitive and Decision Process)*, Academic Press Inc., pp. 1-39, 1975.
- [16] Zadeh, L.A., "Fuzzy Logic and Approximate Reasoning", *Synthese*, v.30, pp. 407-428, 1975.
- [17] Zadeh, L.A., "Fuzzy Sets", *Information and Control*, v.8, pp. 338-353, 1965.
- [18] Zadeh, L.A., "Fuzzy Systems Theory: A Framework for the Analysis of Humanistic Systems", *Systems Methodology in Social Science Research*, pp. 25-41, 1981.