

# SISTEMA DE IDENTIFICAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DE TRANSIENTES EM USINAS NUCLEARES UTILIZANDO MAPAS AUTO-ORGANIZÁVEIS

PAULO H. BIANCHI, BENEDITO D. BAPTISTA F.

Centro de Engenharia Nuclear - CEN, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – IPEN-CNEN/SP,  
Universidade de São Paulo

Av. Prof. Lineu Prestes, 2242 Cidade Universitária, CEP: 05508-900, São Paulo, SP, Brasil

E-mails: bdbfilho@ipen.br, phbianchi@yahoo.com.br.

**Abstract**— The operation of Nuclear Power Plants requires quickness in detecting and precision in the identification of transients that may conduct the operation to unsafe conditions. Artificial intelligence techniques may contribute with the identification and classification of such transients, reducing the possibilities of human failure and increasing the quickness in the response for emergency actions. This article presents an Artificial Neural Network of the Self-Organized Map type designed for such tasks in a Nuclear Power Plant, and also present the extension project of its implementation, which includes proposals to solve questions as reliability, plasticity and interface with the user.

**Keywords**— Nuclear Power Plants, transients identification, Self-Organizing Maps.

**Resumo**— A operação de usinas nucleares exige rapidez na detecção e precisão na identificação de transientes que possam conduzir a situações inseguras. Técnicas de inteligência artificial podem contribuir na identificação e classificação desses transientes, reduzindo as possibilidades de falhas humanas e aumentando a velocidade de resposta para ações de emergência. Este artigo apresenta uma Rede Neural Artificial do tipo Mapa Auto-Organizável preparada para executar tais tarefas em uma Usina Nuclear, bem como detalha o projeto de extensão de sua implementação, que inclui propostas para solucionar questões como confiabilidade, plasticidade e interface com o usuário.

**Palavras-chave**— Usinas Nucleares, identificação de transientes, Mapas Auto-Organizáveis.

## 1 Introdução

A operação de Usinas Nucleares é um assunto de grande importância, tanto no que diz respeito à sua disponibilidade, como também no que tange a segurança, pois da operação dependem os diversos estados aos quais uma usina está sujeita, e se esta é feita de maneira correta e segura, os riscos de acidentes são extremamente reduzidos.

Os novos projetos de Reatores Avançados, como o IRIS (*International Reactor Innovative and Secure*) [Carelli 2003][Carelli et al. 2004] possuem diversas abordagens tecnológicas novas, inclusive no que diz respeito ao monitoramento da Usina.

O monitoramento, atualmente, é feito pelos operadores através da observação das diversas medições provenientes dos sistemas da Usina. Porém, a quantidade de medições é muito grande, o que aumenta o tempo de interpretação dos operadores, e por consequência, o tempo de resposta.

Assim, o Sistema de Identificação e Classificação de Transientes (SICT) foi concebido para interpretar as diversas medições da usina e responder aos operadores qual a tendência do estado atual evoluir para outro estado diferente, caracterizando o que é chamado de estado transiente.

Estes estados transientes podem ser normais e desejáveis, mas também podem ser anormais, acidentais e indesejáveis. Com o SICT, o operador é notificado prontamente da tendência de evolução do siste-

ma para seus próximos estados, e pode tomar as devidas providências a tempo.

O projeto original do SICT consiste em uma implementação dos Mapas Auto-Organizáveis (SOM – *Self-Organizing Maps*), sendo testado com e sem o refinamento feito pela técnica de *Learning Vector Quantization*, LVQ [Haykin 2004].

Neste artigo, serão explanados os sistemas de uma Usina Nuclear analisados pelo SICT, os problemas do monitoramento, o que já foi implementado usando SOM e LVQ e seus resultados, e por fim, quais soluções são pretendidas no projeto de extensão que está sendo executado pelos autores.

## 2 Reatores de Potência e Seus Transientes

Os Reatores de Potência são os Reatores que possuem como finalidade a geração de energia elétrica para fins de consumo geral. Existem outros tipos de Reatores Nucleares, no que diz respeito à sua finalidade, como os Reatores de Pesquisa, que geram calor e até eletricidade, porém não são utilizados para o consumo, mas sim para a pesquisa.

O SICT foi concebido para operar em Reatores de Potência, como o IRIS, e a seguir serão introduzidos quais os sistemas que são analisados pelo sistema, e também os transientes estudados.

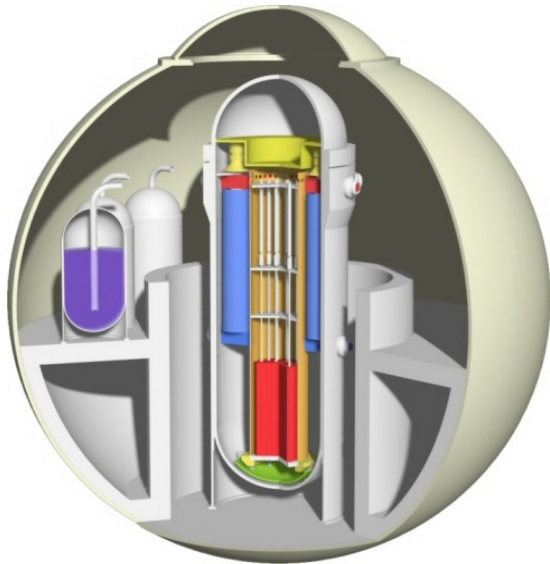


Figura 1. Ilustração do IRIS.

### 2.1 Sistemas de um Reator de Potência

Os sistemas de um Reator de Potência do tipo PWR (*Pressurized Water Reactor*) que são analisados pelo SICT são os Sistema Primário e Sistema Secundário.

Estes dois sistemas possuem circulação de água, porém estas circulações são isoladas fisicamente umas das outras.

O Sistema Primário é o que executa o aquecimento da água, que por sua vez transporta o calor para o trocador de calor, que aquece a água do Sistema Secundário até o ponto de ebulição específico de sua pressão, para que o vapor movimente as turbinas geradoras de eletricidade, como ilustra a Figura 2.

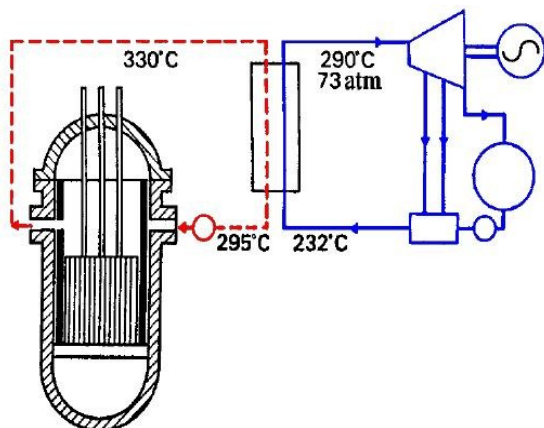


Figura 2. Sistema Primário (Vermelho) e Sistema Secundário (Azul), com temperaturas e pressões exemplares.

O projeto inicial do SICT trabalha com medições de temperatura, vazão e pressão somente, pois são parâmetros comuns a diversos sistemas de usinas geradoras de eletricidade, como usinas a gás ou a carvão, dispensando inicialmente medidas específicas de

Usinas Nucleares, como fluxo de nêutrons, entre outras.

Para a obtenção dos dados necessários ao treinamento do SOM, foram utilizados modelos teóricos do Reator IRIS [Barroso et al. 2003]. E faz parte do projeto de extensão adquirir dados de uma bancada de circulação natural do IPEN (Figura 3), que possui em seu sistema primário um aquecedor elétrico e um trocador de calor, e seu sistema secundário é alimentado por uma caixa de água, e a água aquecida é descartada.

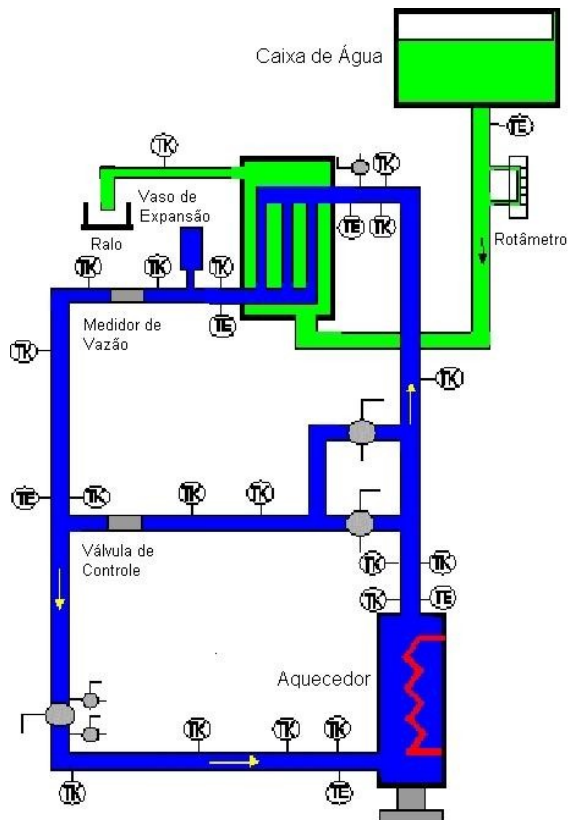


Figura 3. Bancada de Circulação Natural – IPEN, Sistema Primário em Azul e Sistema Secundário em Verde.

A Bancada de Circulação Natural possui este nome por não utilizar bombas para circular a água do sistema primário, mas faz isso dada a diferença de pressões gerada pelo aquecimento da água entre a saída e a entrada do aquecedor.

### 2.2 Os Transientes

Os transientes são os estados de transição entre dois estados específicos da Usina. Por exemplo, podemos citar aumentos e diminuições de potência, de vazão, aberturas de desvios na circulação de água do sistema, desligamento abrupto do aquecedor, entre outros. Os transientes já estudados em [Baptista e Barroso GLOBAL 2003] foram:

Tabela 1. Transientes Utilizados no Treinamento do SOM.

1° 30% Estado Estacionário	17° 100% Rampa -5%/min
2° 40% Estado Estacionário	18° 70% Rampa +5%/min
3° 50% Estado Estacionário	19° 80% Rampa +10%/min
4° 60% Estado Estacionário	20° 50% Rampa +5%/min
5° 80% Estado Estacionário	21° 100% Rampa -10%/min
6° 90% Estado Estacionário	22° 50% Rampa +10%/min
7° 100% Estado Estacionário	23° 90% Rampa +1%/min
8° 105% Estado Estacionário	24° 90% Rampa -1%/min
9° 100% -> Passo -10%	25° 80% Rampa -5%/min
10° 90% -> Passo +10%	26° 70% Rampa -10%/min
11° 90% -> Passo -10%	<b>Transientes Anormais</b>
12° 80% -> Passo +5%	
13° 80% -> Passo -5%	27° 100% -> Passo -50%
14° 60% -> Passo +10%	28° Abertura da Válvula de Segurança
15° 60% -> Passo -10%	29° 90% Pequeno LOCA
16° 50% -> Passo +10%	30° 100% SCRAM

Os transientes do tipo “Passo” significam um aumento de potência direto da quantidade especificada pela porcentagem. O tipo Rampa aumenta a potência gradualmente, até a quantidade especificada. O transiente anormal do tipo “Pequeno LOCA” simula a perda de refrigeração do núcleo do Reator Nuclear (LOCA – *Loss Of Coolant Accident* – Acidente de Perda de Refrigerante), o do tipo SCRAM simula o desligamento brusco do reator. A Abertura de Válvula de Segurança é específica do projeto IRIS [Barroso et al. 2003], e o chamado “Estado Estacionário” não representa um transiente, e sim o seu oposto, o funcionamento estacionado da Usina a uma porcentagem de sua potência máxima.

Espera-se que a RNA SOM aprenda estas classes e as separe de maneira satisfatória, de forma que o sistema classifique de forma confiável e eficiente cada um dos estados da Usina.

### 3 Monitoramento de Usinas Nucleares

A tarefa de monitorar o funcionamento de uma Usina Nuclear consiste em interpretar as medições feitas de seus sistemas. Esta interpretação atualmente é feita por operadores humanos. Existe uma quantidade muito alta de informações vindas dos sistemas da Usina, o que pode ocasionar em uma demora indesejada do operador em interpretar estes dados, e por

conseqüência, uma demora ainda maior para tomar as medidas que podem se tornar necessárias, dependendo do que estiver ocorrendo.

Para exemplificar, utilizamos como exemplo a tela de aquisição de dados da Bancada de Circulação Natural.

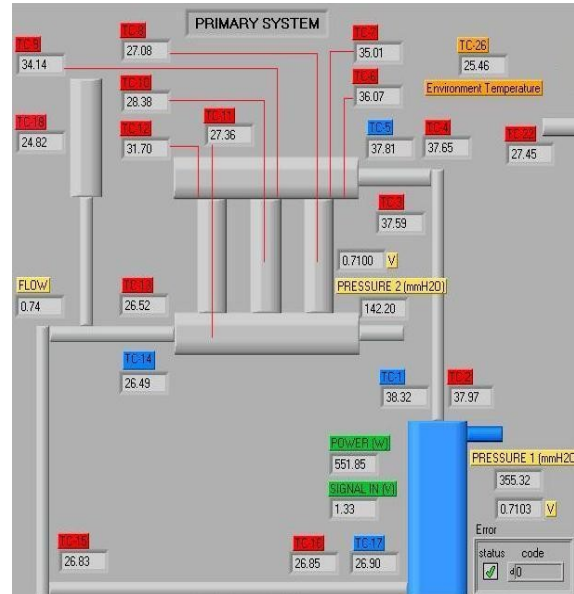


Figura 4. Tela de aquisição de dados da Bancada de Circulação Natural, utilizando o software LabView (visão parcial).

O que vemos nesta tela, é um modelo muito simples, comparável a um Reator de Potência como Angra I ou Angra II. Nestes casos, a quantidade de informações é muito maior, e a complexidade dos sistemas também.

Sendo assim, fica claro que um sistema de auxílio à interpretação destes dados é muito bem vindo, fazendo com que o operador possua uma pré-interpretação de imediato dos estados transitórios ocorrentes na Usina Nuclear.

## 4 A Implementação do SOM

A implementação inicial do SICT consiste em uma Rede Neural Artificial do tipo SOM, como já foi citado anteriormente, utilizando dados gerados a partir do modelo teórico de [Barroso et al. 2003].

Os dados são dispostos em *buffers*, onde são armazenadas as leituras dos vários medidores, de um certo período de tempo.

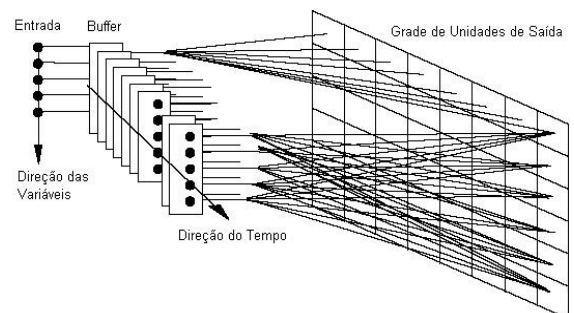


Figura 5. Buffer de dados de entrada do SOM utilizado no SICT.

O SOM utilizado para o treinamento utilizou a seguinte função de vizinhança gaussiana:

$$V_{j,j^0}(n) = \exp\left(-\frac{\|r_j - r_{j^0}\|^2}{2\sigma^2(n)}\right) \quad (1)$$

Onde  $j^0$  indica a unidade vencedora,  $\|r_j - r_{j^0}\|^2$  é a distância euclidiana entre a unidade  $j$  e a unidade vencedora.

$\sigma(n)$  define a largura da vizinhança, começando o maior possível e diminuindo conforme o incremento de  $n$ , ou seja, ao decorrer do treinamento:

$$\sigma(n) = \sigma_0 \exp\left(-\frac{n}{\tau_\sigma}\right) \quad (2)$$

Os pesos são atualizados de acordo com:

$$w_j(n+1) = w_j(n) + \eta(n)[x(n) - w_j(n)] \quad (3)$$

Onde  $x(n)$  é o vetor de entrada. A taxa de aprendizagem  $\eta$  varia como função da distância entre a unidade  $j$  e a unidade vencedora (pela função  $V$ ), e como função do tempo:

$$\eta(n) = \eta_0 \exp\left(-\frac{n}{\tau_\eta}\right) V_{j,j^0}(n) \quad (4)$$

Após esta fase de aprendizagem não-supervisionada, é executado um refinamento utilizando a técnica de Aprendizagem por Quantização Vetorial (LVQ, *Learning Vector Quantization*). A cada unidade é atribuído um rótulo de classe. Para cada dado de entrada  $x_i$  do conjunto de dados de entrada  $\{x_j\}$ , localiza-se o vetor de Voronoi  $w_c$  mais próximo, pertencente ao conjunto de pesos das unidades  $\{w_j\}$ .

Se a classe na qual o vetor  $w_c$  foi rotulado é a mesma do vetor de entrada  $x_i$ , então o vetor  $w_c$  é atualizado como:

$$w_c(n+1) = w_c(n) + \alpha(n)[x_i - w_c(n)] \quad (5)$$

Senão:

$$w_c(n+1) = w_c(n) - \alpha(n)[x_i - w_c(n)] \quad (6)$$

## 5 Resultados

Como foi constatado em [Baptista e Barroso GLOBAL 2003][Baptista e Barroso GENES4/AN-P2003] os resultados foram bastante promissores, com o SICT, em uma versão protótipo para pesquisa,

onde ainda não havia uma preocupação em apresentar de uma maneira simplificada a resposta da rede ao usuário, classificando corretamente diversos transientes apresentados a ele, e o mais importante, logo no início de sua ocorrência, o que pode aumentar o tempo de resposta do operador.

Para exemplificar, segue, na Figura 6, um dos casos analisados mais interessantes. Neste caso, o SICT foi treinado utilizando dados de transientes com dois minutos cada, períodos de aquisição de dois segundos, de nove variáveis diferentes.

A figura 6 representa a resposta do SICT a alguns transientes da tabela 1. A cada nova leitura, o sistema acende a BMU (*Best Matching Unit*), isto é, a unidade que mais se assemelha ao dado de entrada, tendo como critério a distância euclidiana entre os vetores. Ainda na figura 6, estão ilustradas as trajetória representativas das unidades que foram acesas durante a ocorrência dos transientes enumerados.

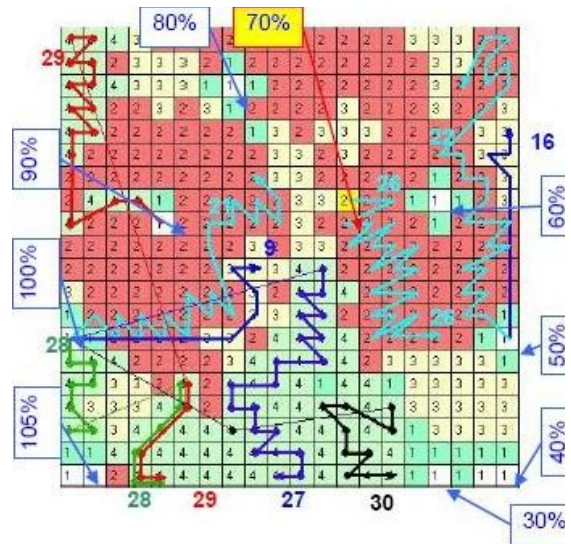


Figura 6. Resposta do SICT a alguns transientes enumerados na tabela 1.

As cores das unidades ou células são correspondentes à sua rotulação enumerada, que por sua vez significam: 1 – Estado Estacionário, 2 – Transientes de Rampa, 3 – Transientes de Passos e 4 – Transientes Anormais.

Tal rotulação, neste exemplo, foi feita através do método de sensibilidade por distância, que consiste em definir qual classe possui a menor distância euclidiana da célula, e o rótulo desta classe se torna o rótulo da célula.

Os estados estacionários estão representados pelas células brancas, e as porcentagens das potências destes estados em relação às potências máximas está nas caixas brancas, conectadas às suas respectivas células por setas.

Ao apresentar à RNA um dado inexistente em seu conjunto de treinamento, o de um estado estacionário a 70% da potência máxima, esta o classificou como um transiente de rampa. Porém, deve ser nota-

do que a sua posição no mapa é coerente com o restante dos estados estacionários, que estão arranjados no sentido anti-horário, de maneira crescente.

## 6 Conclusões

Com base no que foi apresentado neste artigo, podemos concluir que o monitoramento de Usinas Nucleares é um problema complexo, e o auxílio aos operadores por meio de sistemas interpretativos dos dados dos sistemas da Usina é muito útil, principalmente no que diz respeito à disponibilidade e segurança das Usinas Nucleares.

As Redes Neurais Artificiais do tipo Mapas Auto-Organizáveis se mostraram promissoras nos estudos iniciais citados e exibidos neste artigo, e os problemas como plasticidade e confiabilidade dos dados são tratados de forma relativamente simples com os Mapas Auto-Organizáveis, o que incentiva o desenvolvimento atual e futuro do SICT utilizando esta tecnologia de Inteligência Artificial.

A questão da confiabilidade das informações deverá ser tratada utilizando conceitos semelhantes à detecção de estados anormais feita em [Simula e Kangas 1995]. Neste trabalho, o erro de quantização é utilizado para identificar um estado anormal de operação. Porém, o erro de quantização também é uma medida de confiabilidade da informação, quando se possui uma estatística destes erros quando as respostas forem as desejadas, e quando ocorrer o caso contrário. Com estas estatísticas, um limiar pode ser definido para ser utilizado como critério de confiabilidade.

Já quanto à questão da plasticidade, está sendo estudada a possibilidade da implementação de um algoritmo ESOM - *Evolving Self-Organizing Maps* [Deng e Kasabov 2003], ou uma adaptação deste, dadas a sua capacidade de interpretar e aprender dados novos, sem necessitar de conhecimento prévio da distribuição dos dados de entrada.

A interface computacional, que será apresentada ao operador, deve ser de fácil interpretação. Além de exibir as unidades de saída do SOM, deve haver um destaque para uma mensagem clara especificando qual o transiente em curso. As informações referentes à confiabilidade da informação devem ser apresentadas de maneira igualmente simples, incluindo, além de um valor numérico, uma interpretação utilizando uma escala de cores.

Após a aquisição dos dados da Bancada de Circulação Natural, os experimentos de validação poderão ser feitos. Há também a pretensão de executar o treinamento da rede com dados também obtidos da bancada.

## Agradecimentos

Agradecemos ao IPEN-CNEN/SP por disponibilizar a infra-estrutura necessária aos experimentos realizados, e à FAPESP pelo apoio financeiro ao projeto.

## Referências Bibliográficas

- Carelli, M. D. (2003). IRIS: A global approach to nuclear power renaissance. *Nuclear News*. September 2003, 32-42.
- Carelli, M. D., Conway, L.E., Oriani, L., Petrović, B., Lombardi, C.V., Ricotti, M.E., Barroso, A.C.O., Collado, J.M., Cinotti, L., Todreas, N.E., Grgić, D., Moraes, M.M., Boroughs, R.D., Ninokata, H., Ingersoll, D.T., Oriolo, F. (2004). The design and safety features of the IRIS reactor. *Nuclear Engineering and Design*. 230: 151-167.
- Haykin, S. (2004). *Redes Neurais Princípios e Prática*. 2ª Edição, Editora Bookman.
- Barroso A.C.O., Baptista F., B. D., Arone, I.D., Macedo, L.A., Sampaio, P.A.B., Moraes, M. (2003). IRIS PRESSURIZER DESIGN. *Proceedings of ICAPP '03* (Paper 3227), Córdoba, Spain, May 4-7, 2003.
- Baptista F., B.D., Barroso, A.C.O. (2003). Identification of IRIS Reactor Transients with Self-Organized Maps. Paper 1185, approved for the GENES4/ANP2003 Conference, Sep. 15-19, 2003, Kyoto, JAPAN.
- Baptista F., B. D.; Barroso, A. C. (2003). Identification of IRIS Reactor Transients with Self-Organized Maps. *GLOBAL 2003 – Atoms for Prosperity: Updating Eisenhower's Global Vision for Nuclear Energy*. New Orleans, USA, Nov. 16-20, 2003.
- Simula, O., Kangas, J. (1995). Chapter 14 - Process Monitoring and Visualization Using Self Organizing Maps. *Neural Networks for Chemical Engineers*. Volume 6 de *Computer-Aided Chemical Engineering*. Elsevier, Amsterdam.
- Deng, D., Kasabov, N. (2003). On-Line pattern analysis by evolving self-organizing maps. *Neurocomputing*. 51: 87-103. Elsevier Science.