

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: phbianchi@gmail.com, bdbfilho@ipen.br.*

**Abstract**— The monitoring task in Nuclear Power Plants is of crucial importance with respect to safety and efficient operation. The operators have a wide range of variables to observe and analyze; the quantity of variables and their behavior determine the time they have to take correct decisions. The complexity of such aspects in a Nuclear Power Plant influences both, the plant operational efficiency and the general safety issues. This paper describes an experimental system developed by the authors which aims to assist the operators of Nuclear Power Plants to take quick and safe decisions. The system maps the status of plant and helps the operators to make quick judgments by using Artificial Intelligence Methods. The method makes use of a small set of monitored variables and presents a map of the Plant Status in a friendly manner. This system uses an architecture that has multiple Self-Organizing Maps to perform these tasks.

**Keywords**— Nuclear Power Plants, decision support, monitoring, multiple Self-Organizing Maps, identification and classification of transients.

**Resumo**— A tarefa de monitoramento nas Usinas Nucleares é de crucial importância no que tange a segurança e a operação eficiente de suas funções. Os operadores dispõem de uma vasta gama de variáveis para observar e analisar; a quantidade de variáveis e o seu comportamento determinam o tempo que eles tem para tomar decisões corretamente. A complexidade de tais aspectos em uma Usina Nuclear influencia tanto sua eficiência operacional, quanto questões gerais de segurança. Este artigo descreve um sistema experimental desenvolvido pelos autores que tem como objetivo auxiliar os operadores das Usinas Nucleares a tomarem decisões rápidas e seguras. O sistema mapeia o estado da usina e ajuda os operadores a fazerem julgamentos rápidos utilizando métodos de Inteligência Artificial. O método faz uso de um pequeno conjunto de variáveis monitoradas e apresenta um mapa do estado da usina de uma maneira amigável. Este sistema utiliza uma arquitetura que possui múltiplos Mapas Auto-Organizáveis para executar estas tarefas.

**Palavras-chave**— Usinas Nucleares, apoio à tomada de decisões, monitoramento, múltiplos Mapas Auto-Organizáveis, identificação e classificação de transientes (estados transitórios).

## 1 Introdução

Em todos os projetos de instalações nucleares para geração de energia existe a eminente preocupação com a segurança. A Agência Internacional de Energia Atômica (*International Atomic Energy Agency – IAEA* [IAEA 2009]) fornece uma série de guias e documentos regulatórios sobre a segurança das instalações nucleares [IAEA 2006], o que reflete a sua preocupação com o tema.

Os sistemas de segurança implementados podem ser preventivos, como as barreiras de contenção de radiação, ou paliativos. Estes últimos podem ser disparados automaticamente, como o SCRAM (desligamento de emergência do reator nuclear), ou disparados pelos operadores da instalação.

Os operadores fazem uso de uma série de medições provenientes de diversos instrumentos instalados na usina e no reator nuclear. A quantidade de variáveis que estas medições geram é muito grande, o que pode dificultar e atrasar a interpretação delas pelo operador.

O sistema experimental apresentado neste artigo monitora estas variáveis em tempo real e as interpreta, apresentando o estado daquele momento aos operadores de forma amigável e intuitiva, pois utiliza nomenclaturas familiares a eles e sinais de fácil compreensão.

A interpretação das variáveis é feita utilizando a técnica de inteligência artificial conhecida como Mapas Auto-Organizáveis, ou SOM (*Self-Organizing Maps* [Kohonen 2001]).

A arquitetura utilizada com os SOM's consiste em múltiplos mapas especialistas, cada um representando um estado, transitório ou não, do reator nuclear. A identificação e classificação do estado em curso se dá por uma competição entre estes mapas.

Alguns resultados da primeira versão implementada serão apresentados, e podem ser vistos com mais detalhes em [Bianchi 2008]. Estes resultados se mostraram satisfatórios, tendo em vista que esta foi a primeira implementação desta arquitetura de múltiplos SOM's no monitoramento de usinas nucleares.

Por fim, os autores demonstram que tal arquitetura pode ser refinada, para obter resultados mais precisos e detalhados.

## 2 Estados Transitórios dos Reatores de Potência

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, po-

rém não são utilizados para o consumo, mas somente para pesquisa.

O SEICT (Sistema Experimental de Identificação e Classificação de Transitórios), que é como chamaremos o sistema neste artigo, foi concebido para operar em Reatores de Potência, como o IRIS [IRIS 2009].

A seguir serão introduzidos quais os sistemas que são analisados pelo sistema, e também os estados transitórios estudados.

### 2.1 Sistemas Termohidráulicos dos Reatores de Potência

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

Nestes dois sistemas circulam água, porém, são canais de circulação independentes, isto é, a água do sistema primário não tem contato direto com a água do sistema secundário.

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 1.

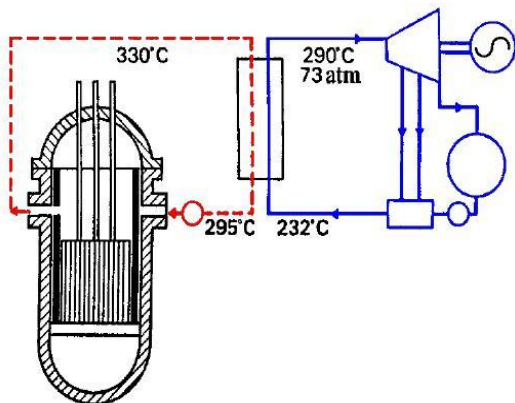


Figura 1. Sistema Primário (Vermelho) e Sistema Secundário (Azul), com temperaturas e pressões exemplares.

O projeto inicial do SEICT 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 no reator, por exemplo.

Em trabalhos anteriores, como [Bianchi e Baptista F. 2007] e [Baptista F. e Barroso 2003] foram utilizados modelos teóricos do Reator IRIS [Barroso et al. 2003]. Já no trabalho presente, os dados utilizados foram extraídos diretamente da Bancada de Circulação Natural do IPEN.

A Bancada de Circulação Natural (BCN), cujo esquema básico pode ser visto na Figura 2, possui este nome porque não utiliza bombas para circular a água do sistema primário, mas o faz devido à diferença de pressões gerada pelo aquecimento da água entre a saída e a entrada do aquecedor.

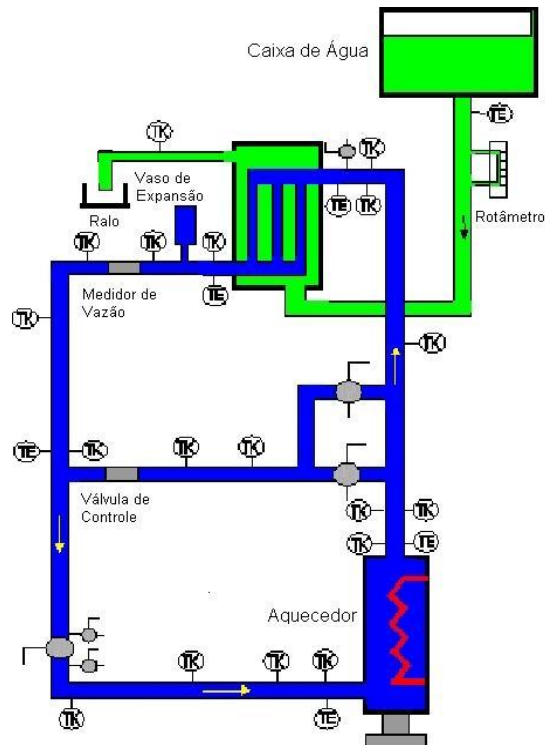


Figura 2. Bancada de Circulação Natural – IPEN, Sistema Primário em Azul e Sistema Secundário em Verde.

### 2.2 Os Estados Transitórios

Levando em consideração as possibilidades da BCN, os seguintes estados foram simulados:

- Aquecimento
- Resfriamento
- Regime Permanente
- Rampas
- Steps
- Abertura de uma linha de desvio no sistema primário (ALDP)
- Bloqueio de vazão no sistema primário (BVP)
- Bloqueio de vazão no sistema secundário (BVS)

Sendo os três últimos estados transitórios anormais, isto é, indicadores de perigo de acidentes.

Os parâmetros utilizados nos experimentos para aquisição de dados estão expostos nas Tabelas 1 e 2.

Tabela 1 – Experimentos sobre transitórios anormais

Experimento	Potência Média do Aquecedor	Vazão do Sistema Secundário	Transitório Simulado
1	500W	60 l/h	-
2	1000W	60 l/h	BVP
3	1500W	60 l/h	-
4	2000W	60 l/h	ALDP
5	2500W	60 l/h	BVS
6	500W	120 l/h	-
7	1000W	120 l/h	BVP
8	1500W	120 l/h	-
9	2000W	120 l/h	ALDP

10	2500W	120 l/h	BVS
----	-------	---------	-----

Tabela 2 – Experimentos simulando rampas e *steps*

Experimento	Varição de Tempo	Tipo de Transitório
1	10 min	Step
2	10 min	Rampa
3	20 min	Step
4	20 min	Rampa

A quantidade de dados gerados é muito grande. Um maior detalhamento sobre eles pode ser visto em [Bianchi 2008].

Os estados transitórios do tipo Rampa e Bloqueio de Vazão do Sistema Secundário não foram utilizados no sistema, pois o tipo rampa pode ser agregado aos dados de aquecimento e resfriamento, e o Bloqueio de Vazão do Sistema Secundário demora a gerar dados significativos, devido à grande inércia do sistema de circulação natural da bancada experimental.

### 3 Implementação do Sistema

Neste artigo destacamos as características referentes à construção do módulo de IA do SEICT que utiliza múltiplos SOM's. Mas primeiro é necessário explicar o processo de treinamento das redes neurais.

#### 3.1 Treinamento

O processo de treinamento se subdivide em três partes. São elas:

- Subdivisão para aplicação de *Cross Validation*;
- Normalização vetorial
- Treinamento das redes

O treinamento dos SOM's faz uso da técnica de *Cross Validation* [Flexer 1996], que no caso deste trabalho consiste em dividir os dados de treinamento em dois conjuntos:

- Conjunto de Treinamento
- Conjunto de Validação

O conjunto de treinamento é utilizado efetivamente no treinamento das redes, e o conjunto de validação é reservado para ser apresentado às redes após o término do seu treinamento, para poder avaliar como a mesma se comporta frente a dados desconhecidos.

A utilização desta técnica permite uma melhor avaliação do desempenho das redes, e também a exibição de uma medida de confiabilidade aos operadores do sistema, que chamamos aqui de “Semáforo” (Seção 3.4).

#### 3.2 Algoritmo de treinamento dos SOM's

Nos vetores dos conjuntos de treinamento, os dados são dispostos sequencialmente representando um intervalo de tempo, onde são armazenadas as leituras dos vários medidores, de um certo período.

Os SOMs possuem uma estrutura topológica, chamada de camada de saída, que possui neurônios que se relacionam ao chamado livro de códigos. A disposição dos neurônios topologicamente na camada de saída, neste trabalho, foi testada de duas maneiras: hexagonal e quadrada. O livro de códigos possui as informações referentes ao conhecimento da rede em relação ao universo apresentado a ela durante o treinamento. A rede auto-organiza os dados de tal forma que conhecimentos similares armazenados no livro de códigos se relacionarão a neurônios na camada de saída próximos uns dos outros, o que provê uma análise de similaridade baseada na topologia da camada de saída.

O algoritmo utilizado neste trabalho é do tipo *Batch* [Kohonen 2001], que possui 4 etapas:

1 – **Inicialização:** todos os valores do livro de códigos do SOM são preenchidos utilizando valores do próprio conjunto de treinamento.

2 – **Casamento por similaridade em bloco:** todos os códigos do livro de códigos são separados em grupos de similaridade, sendo que cada grupo corresponde a um código do livro de códigos. O critério de agrupamento é o de similaridade por distância euclidiana, isto é, os padrões de treinamento que mais se assemelharem ao neurônio, ficarão no grupo correspondente a ele.

3 – **Atualização:** Cada código do livro de códigos é atualizado, sendo que os seus novos valores são as médias dos seus respectivos grupos de similaridade.

4 – **Continuação:** Repita do passo 2 algumas vezes.

Sendo assim, a sua representação matemática fica:

$$w_i(n+1) = \frac{\sum_j q_j * h_{ji}(n) * x_j}{\sum_j n_j * h_{ji}(n)} \quad (1)$$

Onde  $w_i(n)$  é o código no livro de códigos com índice  $i$ , na  $n$ -ésima época (iteração),  $x_j$  é o padrão do conjunto de treinamento com índice  $j$ ,  $h_{ji}$  é uma função de  $n$  chamada “função geral de vizinhança”, e  $q_j$  é o número de padrões pertencentes ao grupo de similaridade do neurônio correspondente ao código de índice  $i$ . A função geral de vizinhança, quando multiplicada com  $q_j$ , influencia a mudança de pesos conforme a distância do neurônio  $i$  para os padrões mais semelhantes a ele.

Depois do treinamento, o SOM responde aos padrões de entrada indicando a BMU (*Best Matching Unit* – “Melhor unidade casada”), que corresponde ao neurônio da camada de saída que possui o código no livro de códigos com o menor erro de quantização em relação ao padrão de entrada. O erro de quantização também é calculado utilizando a distância euclidiana.

#### 3.3 Arquitetura de Múltiplos SOM's

A arquitetura implementada no SEICT consiste em utilizar uma rede para cada estado transitório, e treiná-las usando somente os dados do seu estado transitório correspondente, como mostrado na Figura 3.

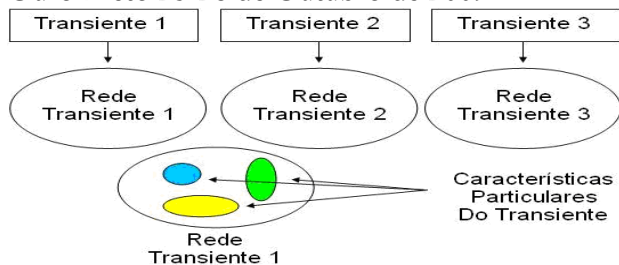


Figura 3. Diagrama didático da arquitetura de múltiplos SOM's

Os dados de entrada do sistema (as variáveis de monitoramento) são apresentados para todas as redes. Cada uma delas encontra a sua BMU, com o erro de quantização correspondente. E então, as redes competem entre si, através da comparação dos erros de quantização das suas BMU's. A rede que possuir o menor erro de quantização vence, e o sistema classifica o estado em curso verificando qual transitório esta rede representa.

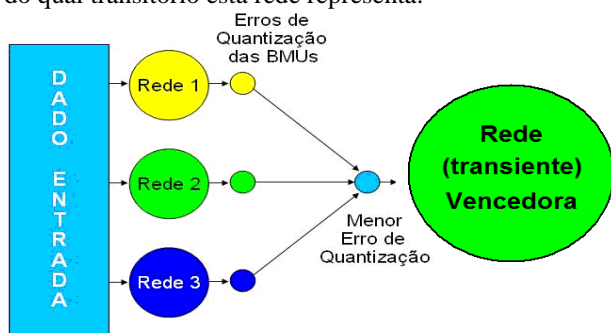


Figura 4. Competição entre as redes

### 3.4 Semáforo

O semáforo é apresentado para os operadores como o seu nome indica: três cores indicando níveis de confiabilidade.

Estes níveis de confiabilidade são avaliados utilizando o erro de quantização da BMU da rede vencedora.

Seu valor é comparado às médias dos erros de quantização gerados quando a rede é apresentada ao seu conjunto de treinamento e também de validação, e considerando os desvios padrões, como mostrado na Figura 5.



Figura 5. Ilustração dos intervalos gerados pelas médias dos erros de quantização com os seus desvios padrões

Como as cores indicam, o que se situar na região vermelha é classificado ao operador com o "sinal vermelho" (não confiável), na faixa amarela como "sinal amarelo" (pouco confiável), e na verde como "sinal verde" (confiável).

Estas medidas indicam o grau de confiabilidade da própria rede em sua inferência, auxiliando assim ao operador na sua interpretação do resultado do sistema.

O objetivo primário do SEICT é interpretar corretamente as variáveis de monitoramento em termos familiares aos operadores, isto é, rotulá-las como sendo um dos transientes tratados.

Sendo assim, a avaliação do desempenho do sistema é feita contando quantas interpretações corretas são feitas, em relação ao total de interpretações.

A avaliação do sistema consiste em escolher, das diversas redes geradas durante o treinamento (devido à variação dos seus parâmetros de treinamento), a melhor combinação das redes, considerando que cada uma deve representar um estado transitório distinto.

Em [Bianchi 2008] duas técnicas foram utilizadas, mas neste artigo será apresentada a que obteve melhor resultado, que foi cruzar todas as combinações possíveis (produto cartesiano) das redes geradas durante o treinamento, e avaliar a porcentagem de acertos (interpretações corretas) de cada combinação.

É claro que o número de combinações possíveis logo se torna muito grande (por exemplo,  $240^7$  combinações em um dos experimento com somente 7 estados transitórios), obrigando assim a reduzir os parâmetros de treinamento utilizados.

## 4 Resultados

Por utilizar uma avaliação de desempenho que envolve muitas combinações, como explicado na seção anterior, algumas variáveis de treinamento foram suprimidas no experimento exposto aqui.

Os estados transitórios do tipo *Step* foram subdivididos em dois tipos: positivos e negativos. Assim resultando em sete estados transitórios, e por conseguinte, sete redes "especialistas" a serem selecionadas dos treinamentos.

As sete redes especialistas selecionadas por meio da avaliação por produto cartesiano fizeram uso dos parâmetros de treinamento da Tabela 3. A palavra "Malha" refere-se à disposição dos neurônios na camada de saída.

Tabela 3 – Parâmetros de treinamento

	A	Re	RP	Sp	Sn	LD	BP
Épocas	5	3	2	2	2	2	2
Malha	H	Q	H	H	H	H	H

Onde:

A – Aquecimento

Re – Resfriamento

RP – Regime Permanente

Sp – *Step* positivo

Sn – *Step* negativo

LD – Abertura de linha de desvio

BP – Bloqueio de vazão do sistema primário

H – Malha hexagonal

Q – Malha quadrada

O desempenho médio obtido por meio destas redes se encontra na Tabela 4.

Tabela 4 – Medidas de desempenho

% Acertos	% Indicações Verde	% Indicações Amarelo	% Indicações Vermelho
87,30	55,32	30,35	14,33

A quantidade de vezes em que cada uma das indicações do semáforo acendeu pode ser melhor visualizada na Figura 6.

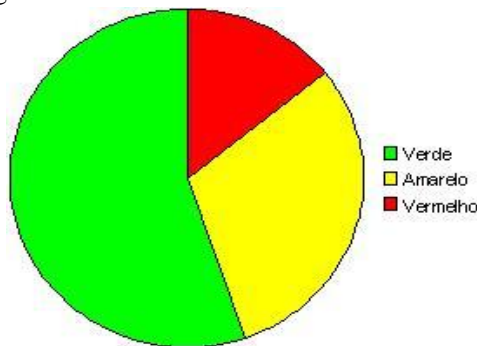


Figura 6 – Acendimento do semáforo

Por último, a tela do operador exibe os resultados conforme a Figura 7.

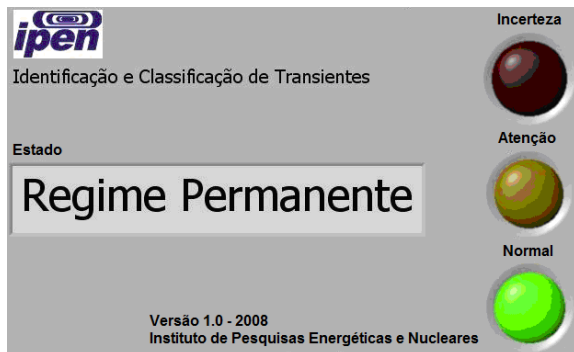


Figura 7 – Apresentação do estado de Regime Permanente, com sinal verde para o operador

## 5 Conclusões

O SEICT confirma, apesar de uma quantidade de acertos que ainda deve ser aumentada, que um sistema de classificação e identificação de estados transitórios pode ser implementado de maneira satisfatória utilizando técnicas de Inteligência Artificial, e ser utilizado em usinas geradoras de energia.

Uma das vantagens em se utilizar um sistema baseado em IA é a sua performance. O SEICT ainda possui a vantagem de classificar os dados de uma maneira semelhante à que os operadores o fariam, só que de maneira praticamente instantânea.

Isto oferece uma maior agilidade aos operadores em suas tomadas de decisão, já que o sistema possui um alto grau de confiabilidade pois, nos casos em que pode ter um desempenho mais baixo na classificação dos transitórios, o mesmo avisa ao usuário através da sua medida de confiabilidade, traduzida na forma de um semáforo.

O uso de múltiplos SOM's permite que, em implementações futuras, o sistema forneça detalhes sobre o estado transitório em curso, já que o SOM organiza o que é apresentado a si durante o treinamento, topologicamente e por similaridade. Observando esta organização é possível atribuir rótulos às diversas unidades de cada rede, cada qual indicando um detalhamento das características do estado transitório.

O desempenho do sistema pode ser melhorado drasticamente, por exemplo, aprimorando as técnicas de avaliação de desempenho. Uma possibilidade é modificar a Função de Medida de Desempenho, apresentada em [Bianchi 2008], que não obteve resultados melhores que a avaliação por produto cartesiano nos experimentos feitos até a finalização deste trabalho, mas é passível de modificações e melhorias, diferentemente da técnica de produto cartesiano.

## Referências Bibliográficas

- 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.
- 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.
- Bianchi, P. H. (2008). Sistema de Identificação e Classificação de Transientes em Reatores Nucleares. Dissertação (Mestrado). *Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares*, São Paulo - SP, Brasil.
- Bianchi, P. H.; Baptista F., B. D. (2007). Sistema De Identificação e Classificação de Transientes em Usinas Nucleares utilizando Mapas Auto-organizáveis. *VIII Congresso Brasileiro de Redes Neurais*. Florianópolis, Santa Catarina, Brasil, 8 a 11 de outubro de 2007.
- Flexer A. (1996). Statistical Evaluation of Neural Network Experiments: Minimum Requirements and Current Practice. *13TH EUROPEAN MEETING ON CYBERNETICS AND SYSTEMS RESEARCH*. Austrian Society for Cybernetic Studies, Vienna, 2 vols., pp.1005-1008, 1996. Proceedings.
- IAEA (2009). *International Atomic Energy Agency (IAEA)*. Endereço eletrônico: <http://www.iaea.org/>. Acessado em 09/04/2009.
- IAEA (2006). *Fundamental Safety Principles*. Endereço eletrônico: <http://www-pub.iaea.org/mtcd/publications/PubDetails.asp?pubId=7592>. Acessado em 09/04/2009.
- IAEA (2006). *Effective Nuclear Regulatory Systems: Facing Safety and Security Challenges*. Endereço eletrônico: <http://www-pub.iaea.org/mtcd/publications/PubDetails.asp?pubId=7553>. Acessado em 09/04/2009.
- IRIS (2009). *IRIS Official Web Site*. Endereço eletrônico: <http://hulk.cesnef.polimi.it/>. Acessado em 09/04/2009.
- Kohonen, T. (2001). *Self-Organizing Maps*. Third extended edition. Springer, New York.