



AUTARQUIA ASSOCIADA À UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

**SISTEMA DE IDENTIFICAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DE
TRANSIENTES EM REATORES NUCLEARES**

PAULO HENRIQUE BIANCHI

Dissertação apresentada como parte
dos requisitos para obtenção do Grau
de Mestre em Ciências na Área de
Tecnologia Nuclear - Reatores.

Orientador:
Dr. Benedito Dias Baptista Filho

**São Paulo
2008**



INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES

Autarquia associada à Universidade de São Paulo

SISTEMA DE IDENTIFICAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DE TRANSIENTES EM
REÁTORES NUCLEARES

PAULO HENRIQUE BIANCHI

Dissertação apresentada como parte
dos requisitos para obtenção do grau
de Mestre em Ciências na Área de
Tecnologia Nuclear – Reatores.

Orientador:
Dr. Benedito Dias Baptista Filho

SÃO PAULO
2008

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES

Autarquia associada à Universidade de São Paulo

SISTEMA DE IDENTIFICAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DE TRANSIENTES EM
REATORES NUCLEARES

PAULO HENRIQUE BIANCHI



Dissertação apresentada como parte dos requisitos para obtenção do grau de Mestre em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear – Reatores.

Orientador:

Dr. Benedito Dias Baptista Filho

SÃO PAULO
2008

Dedico este trabalho a três pessoas muito especiais:

Ao meu pai Attilio, por me transmitir o seu fascínio pela ciência

À minha mãe Lúcia, por me ensinar a acreditar em mim mesmo

E à minha tia Graciete, por ter me tornado uma pessoa encantada pela leitura e
pela educação

Agradecimentos

Gostaria de agradecer aos meus familiares, que passaram junto comigo pelas dificuldades deste período intenso e tão importante da minha vida.

Agradeço também à minha namorada Maira, que me ajudou e apoiou desde o início, sempre paciente e tolerante a todos os imprevistos.

Devo agradecimentos aos professores que tive neste curso, que fizeram enriquecer meu intelecto e minha vida.

E, por fim, agradeço ao professor Benedito, que confiou em mim desde o primeiro momento, e que para sempre terá a minha estima e amizade.

“[É] mais freqüente que a confiança seja gerada pela ignorância do que pelo conhecimento: são os que conhecem pouco, não os que conhecem muito, os que afirmam tão positivamente que este ou aquele problema nunca será solucionado pela ciência”.

Charles Darwin, *The Descent of Man* (1871)

SISTEMA DE IDENTIFICAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DE TRANSIENTES EM REATORES NUCLEARES

Paulo Henrique Bianchi

RESUMO

Este trabalho descreve o estudo e testes de um sistema capaz de identificar e classificar os transientes, ou estados transitórios, de sistemas termo-hidráulicos, utilizando a técnica de redes neurais artificiais do tipo mapas de características auto-organizáveis, com o objetivo de sua implantação nas novas gerações de reatores nucleares.

A técnica desenvolvida neste trabalho consiste no uso de múltiplas redes para fazer a classificação e identificação dos estados transitórios, sendo cada uma especialista em um respectivo transitório do sistema, que competem entre si por meio do erro de quantização, que é uma medida gerada por estas redes neurais. Esta técnica se mostrou eficiente, apresentando características muito promissoras no que diz respeito ao desenvolvimento de novas funcionalidades em futuros projetos. Uma dessas características consiste no potencial de que a rede, além de responder qual estado transitório está em curso, também pode oferecer informações adicionais sobre esse transitório.

NUCLEAR REACTORS TRANSIENTS IDENTIFICATION AND CLASSIFICATION SYSTEM

Paulo Henrique Bianchi

ABSTRACT

This work describes the study and test of a system capable to identify and classify transients in thermo-hydraulic systems, using a neural network technique of the self-organizing maps (SOM) type, with the objective of implanting it on the new generations of nuclear reactors.

The technique developed in this work consists on the use of multiple networks to do the classification and identification of the transient states, being each network a specialist at one respective transient of the system, that compete with each other using the quantization error, that is a measure given by this type of neural network. This technique showed very promising characteristics that allow the development of new functionalities in future projects. One of these characteristics consists on the potential of each network, besides responding what transient is in course, could give additional information about that transient.

SUMÁRIO

	Página
1. INTRODUÇÃO	9
1.1. Histórico	9
1.2. Identificação e Classificação de Transientes	15
1.3. A Identificação e Classificação de Transientes com Inteligência Artificial	15
1.4. Trabalhos Correlatos	16
2. OBJETIVO	20
3. FUNDAMENTOS TEÓRICOS	21
3.1. As Redes Neurais Artificiais	21
4. METODOLOGIA	24
4.1. Aquisição de Dados	24
4.1.1. A Bancada de Circulação Natural	25
4.1.1.1. Aquecedor	26
4.1.1.2. Trocador de Calor.....	27
4.1.1.3. Instrumentação	28
4.1.1.4. Controle.....	29
4.1.2. Transientes Tratados	30
4.1.3. Plano de experimentos	31
4.2. Redes Neurais Artificiais	33
4.2.1. Treinamento	34
4.2.2. Técnicas de avaliação de desempenho das redes neurais.....	40
4.2.2.1. Função de Medida de Desempenho.....	40
4.2.2.2. Produto Cartesiano	41
4.2.3. Semáforos	41
4.3. Interface com o Usuário.....	42
5. RESULTADOS	44
5.1. Aquisição de Dados	44
5.2. Redes Neurais	53
5.3. Interface com o Usuário.....	59
6. ANÁLISE DE RESULTADOS	62
6.1. Aquisição de Dados	62
6.2. Redes Neurais	62
6.3. Interface com o Usuário.....	64
7. CONCLUSÕES	65
APÊNDICE A – Dados gerados pela avaliação via produto cartesiano	67
APÊNDICE B – Experimentos feitos na bancada de circulação natural	80
BIBLIOGRAFIA	91

1. INTRODUÇÃO

1.1. Histórico

A energia nuclear pode desempenhar importante papel na oferta de energia limpa, segura e econômica com a certeza de suprimento e sem emissão de poluentes que agravem o “efeito estufa”. No entanto, seu futuro depende do desenvolvimento de novos conceitos de reatores com características avançadas e inovadoras, capazes de superar desafios econômicos e de aceitação pública.

O Departamento de Energia (DOE) dos Estados Unidos motivou a reunião de um grupo de países iniciando o que ficou denominado de “Foro Internacional de Reatores de IV Geração (GIF)”. O principal objetivo dessa iniciativa foi o de identificar, avaliar e definir as necessidades de desenvolvimento de novos sistemas de energia nuclear que tivessem boa aceitação pública e que pudessem ser licenciados, construídos e operados satisfazendo as necessidades de quatro grandes áreas:

Desenvolvimento sustentável: A capacidade de atender as necessidades da nossa geração sem comprometer as gerações futuras, ou seja, atender as necessidades da sociedade indefinidamente no futuro. As metas de sustentabilidade englobam os aspectos de utilização mais eficaz do combustível, minimização e gerenciamento de rejeitos e impacto ambiental visando além dos benefícios de impacto positivo em termos de aquecimento global, a redução do volume e do período necessário para estocagem de rejeitos e a extensão quase que indefinida das reservas de combustível nuclear.

Competitividade: As metas de “economicidade” para os sistemas nucleares de energia, visam além de uma posição bem vantajosa na análise do ciclo de vida, obter também vantagem nos custos de produção e riscos financeiros aceitáveis quando comparados com outras opções de geração de eletricidade. Considera-se ainda a produção de hidrogênio, água potável, calor aquecimento distrital e outros produtos.

Segurança e confiabilidade: esta é uma área de alta prioridade no desenvolvimento da próxima geração de reatores. As metas de segurança e

confiabilidade consideram a operação confiável, o aperfeiçoamento no gerenciamento de acidentes e a minimização de suas conseqüências, considerando ainda a proteção no investimento e a redução na necessidade de resposta a emergências fora da instalação (“off-site emergency response”).

Resistência à proliferação e proteção física: Considera metas que avaliam as características intrínsecas e extrínsecas de resistência a proliferação e proteção física dos sistemas nucleares de geração de energia e seus respectivos ciclos de combustível.

Observa-se que, antes do desenvolvimento da quarta geração de reatores, os investimentos em novas centrais deverão considerar os reatores avançados, no conceito de reatores inovativos como: CAREM, IRIS e PBMR.

O Brasil, por intermédio da CNEN e da NUCLEP, é um dos parceiros no desenvolvimento do conceito IRIS – “International Reactor Innovative and Secure,” que está sendo desenvolvido por meio de um projeto de cooperação internacional envolvendo aproximadamente mais de vinte instituições, entre empresas, centros de pesquisa e universidades. O IRIS é um conceito de reator que poderá ser utilizado em médio prazo, ou seja, no início da segunda década do século 21.

Promover o desenvolvimento dos povos e nações menos privilegiados é mais que uma bandeira de grandes organizações ou potências; é uma necessidade para a sobrevivência de toda a humanidade. Para isso, o desenvolvimento tem que ser sustentável, não limitado a aspectos econômicos apenas, mas com continuidade assegurada. As nações mais desenvolvidas, que consomem a maior parte da energia gerada no mundo, têm uma matriz energética fundada principalmente em recursos fósseis, que, estima-se, poderão esgotar no futuro. Além disso, essa matriz, se estendida no mesmo nível de demanda a toda humanidade, pode causar danos graves ao meio ambiente. Desenvolver essa maioria, tão distante do patamar de desenvolvimento das grandes nações, requer recursos energéticos ainda inacessíveis ou economicamente inviáveis.

Muitos cenários têm sido construídos com base nos mais variados pontos de vista. Quando, no entanto, se procura considerar a saúde futura para toda humanidade, se conclui que não existe uma única solução: *as alternativas*

devem ser versáteis e inteligentes, adaptadas a características globais e regionais ao mesmo tempo. Uma das análises mais coerentes que encontramos, foi apresentada pela “the Intergovernmental Panel on Climate Change” (IPCC). A IPCC apresenta em seu relatório “Special Report on Emissions Scenarios” (SRES) [5], a fusão de 40 cenários em quatro grandes grupos representativos: A1, A2, B1 e B2. Cada um desses grupos de cenários representa diferentes níveis de desenvolvimento demográfico, social, econômico, tecnológico e ambiental. A Figura 1 ilustra como cada um desses fatores influi nos ramos. Os objetivos econômicos são os “atratores” nos ramos A, no topo da figura, enquanto que os objetivos ambientais dominam os ramos B. Os ramos 1 à esquerda incorporam fortes tendências de globalização e uma integração internacional maior, enquanto que os ramos 2, à direita, caracterizam a acentuação do regionalismo ao invés da globalização.

Em resumo, o ramo A1 e sua família de cenários descrevem um mundo futuro de muito rápido crescimento econômico, pequeno crescimento populacional e com a rápida introdução de novas e mais eficientes tecnologias. O ramo A2 considera cenários para um mundo muito heterogêneo. As bases são a autoconfiança e a preservação da identidade regional, com alto crescimento populacional. O desenvolvimento econômico é orientado predominantemente pela regionalidade e o crescimento econômico per capita e as mudanças tecnológicas são mais fragmentados e lentos que nos outros ramos. O ramo B1 e sua família de cenários descreve um mundo convergente com o mesmo baixo crescimento populacional que em A1, mas com rápidas mudanças nas estruturas econômicas na direção de serviços e informação, com redução na intensidade de demanda de matéria prima e com a introdução de tecnologias limpas e eficientes. A ênfase é em soluções globais para os desafios resultantes da demanda econômica, desafios estes tanto sociais quanto ambientais, incluindo o aumento na equidade, mas sem iniciativas adicionais em clima. O ramo B2 e seus correspondentes cenários descrevem um mundo no qual a ênfase está nas soluções locais para os desafios econômicos, sociais e ambientais; esse é um mundo de moderado crescimento populacional, níveis intermediários de desenvolvimento econômico, e uma mais lenta e mais diversificada mudança tecnológica. Enquanto orientado

para a proteção ambiental e a equidade social, esse ramo focaliza níveis locais e regionais.

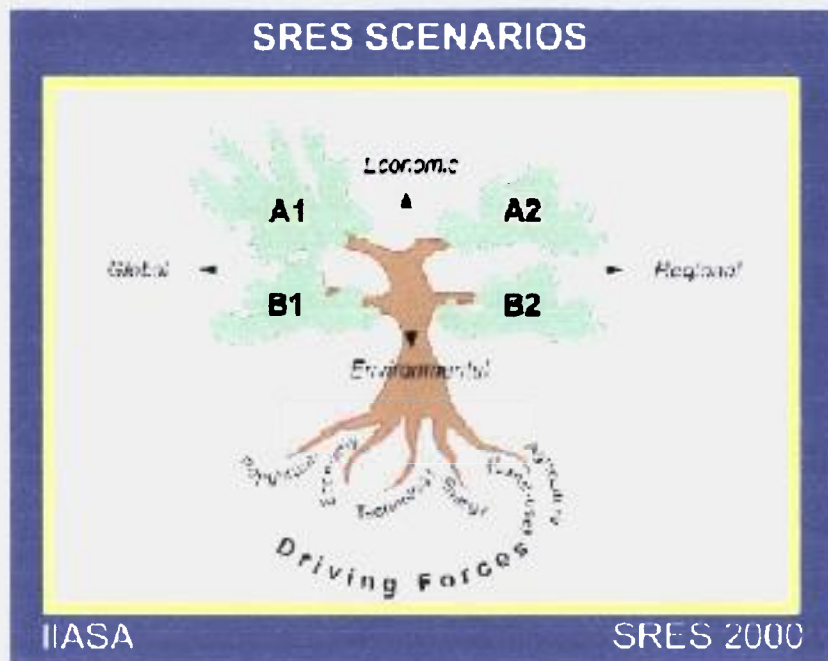


Figura 1 - Árvore de agrupamento dos diversos cenários da energia.

Com base nesses estudos a Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA), coordenando um projeto internacional para estudar os potenciais da energia nuclear como contribuinte nesses cenários, destacou um período em que a energia nuclear pode contribuir com o desenvolvimento de estratégias globais. Essa conclusão foi um dos resultados de projeto de cooperação internacional denominado INPRO; “International Project on Innovative Nuclear Reactors and Fuel Cycles” [6]. Esses estudos mostram que mesmo nos piores cenários para o setor, a energia nuclear ainda será necessária até que a energia solar possa ser utilizada em larga escala. Sabe-se, contudo, que a contribuição da energia nuclear irá depender de vários fatores relacionados a seu desempenho, segurança, aceitação, e sustentabilidade. Por esses motivos há a necessidade de se definir requisitos para novas gerações de reatores e para identificar que projetos têm potencial de viabilização em médio, aproximadamente 15 anos, e longo prazo.

O Brasil participa de duas iniciativas com esses objetivos, a liderada pela AIEA (INPRO), e a liderada pelo Departamento de Energia (DOE) dos Estados Unidos, conhecida como Generation IV (GIF) [7, 8]. Nas duas iniciativas

se definem requisitos para tornar a opção nuclear mais competitiva e segura. No entanto, para satisfazer esses requisitos ainda é necessária muita pesquisa e desenvolvimento tecnológico. Espera-se que reatores seguindo essas linhas estejam disponíveis somente após 2030. Nesse ínterim, o Brasil participa de um programa que busca oferecer alternativas em prazos menores. Originado por uma demanda do departamento de energia dos Estados Unidos, um projeto se transformou em um consórcio internacional batizado com o próprio nome do reator concebido: IRIS "International Reactor Innovative & Secure". O IRIS está sendo desenvolvido por um consórcio de 22 instituições de 9 países liderado pela Westinghouse [1, 2, 3, 9, 10]. As referências [11-13] descrevem a participação brasileira liderada pela CNEN.

O reator IRIS procura atender aos desafios apresentados introduzindo melhorias nas questões referentes à: segurança, proliferação nuclear, rejeitos, economia e finanças. O conceito básico proposto para alcançar essas melhorias é o de um reator integral (Fig. 2) a água pressurizada, com uma potência de 1000MW térmicos. Essa configuração visa atender o mercado para usinas de médio porte, aproveitar a extensa experiência acumulada na operação dos reatores à água pressurizada existentes no mundo e aumentar a segurança, eliminando ou minimizando a possibilidade de ocorrência de uma série de acidentes, entre eles o acidente de perda de refrigerante. Um dos fatores que pode contribuir para melhorar a segurança, diminuir os riscos econômicos e melhorar o desempenho desse, e mesmo de outros reatores em operação, é a disponibilidade de sistemas de interface homem-máquina (SIHM) avançados. Esses sistemas auxiliam os operadores do reator a mantê-lo em regiões de operação mais estáveis diminuindo riscos de estados transitórios (ou transientes) com potencial de provocar paradas forçadas; aumentando ainda a disponibilidade da instalação e conseqüentemente seu potencial de retorno financeiro.

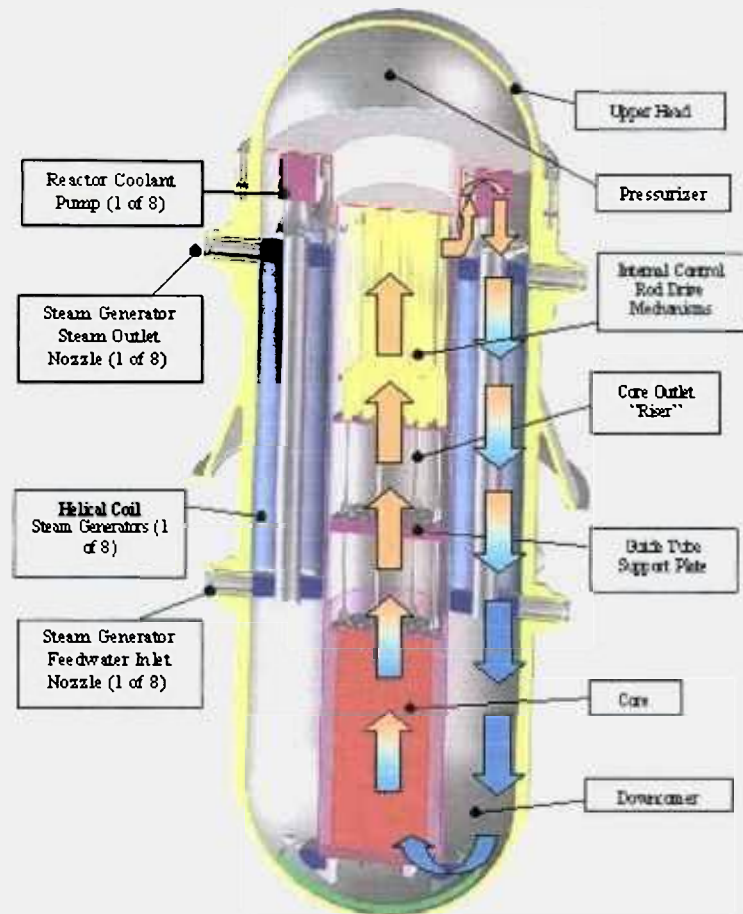


Figura 2 - Reator Integrado IRIS.

Um dos objetivos deste projeto é o desenvolvimento de um sistema de informações que dê suporte à equipe de operação de reatores de nova geração (como o IRIS) com o fim de tornar sua operação mais segura e aumentando o fator disponibilidade pela redução das paradas forçadas. A proposta é o desenvolvimento de um “Sistema de Classificação e Identificação de Transientes” que, atuando durante a operação do reator, aponte o início, ou a tendência de evolução insegura, de transitórios operacionais para condições de emergência.

Tem-se investido muito em técnicas de inteligência artificial para apoio a sistemas de supervisão de processo. Uma das técnicas mais promissoras que surge nesse campo consiste na utilização dos Mapas de Características Auto-Organizáveis de Kohonen (SOMF) [14]. Esses mapas nada mais são do que redes neurais artificiais muito peculiares que tiveram seu desenvolvimento motivado pela observação de uma característica do cérebro humano: a organização de entradas sensoriais como visão e tato, representadas por mapas organizados topologicamente. Desta forma, pretende-se utilizar neste trabalho

técnicas de identificação e classificação de estados transitórios baseadas em Mapas Auto-Organizáveis.

1.2. Identificação e Classificação de Transientes

O problema da identificação e classificação de estados transitórios, ou transientes, é pertinente no que diz respeito ao tempo de resposta dos operadores e demais funcionários de um Reator Nuclear.

Atualmente, os operadores reconhecem os diversos estados transitórios de um reator de maneira subjetiva, interpretando uma série de mostradores numéricos que, por sua vez, representam diversas variáveis provindas dos sistemas do reator.

Porém, estas variáveis, e seus mostradores, são muito numerosos. Cada transitório pode ser identificado de maneiras peculiares, sendo que, se o operador em um dado instante está atento a uma variável específica, pode perder uma variação importantíssima e característica de um transitório indesejável, ou até mesmo acidental, de outra variável.

Sendo assim, um sistema que monitore todas as variáveis ao mesmo tempo, e ainda identifique e classifique transientes utilizando uma classificação muito próxima à subjetiva utilizada pelos operadores, se faz extremamente útil no que diz respeito à operação eficiente e segura dos reatores, e até mesmo de outros sistemas industriais.

Vale lembrar que não basta possuir um sistema que faça e apresente tais identificações e classificações aos operadores, mas tal sistema deve fazê-lo utilizando uma interface amigável e de fácil compreensão pelos operadores.

Sendo assim, a interface com o usuário é um tópico a ser tratado com cuidado e atenção às necessidades dos operadores e funcionários de um reator nuclear.

1.3. A Identificação e Classificação de Transientes com Inteligência Artificial

O caráter subjetivo das classificações feitas pelos operadores torna necessário que o sistema seja capaz de utilizá-las em suas respostas aos usuários.

As técnicas de inteligência artificial são capazes de produzir ferramentas que possibilitam a utilização de classificações tidas como subjetivas em seu mecanismo e funcionamento.

Estas técnicas também possuem a característica de normalmente serem mais rápidas que os métodos analíticos que poderiam ser utilizados caso cumprissem o pré-requisito de classificarem de maneira semelhante ao que os operadores estão habituados.

Existe também o fator ruído. A técnica de inteligência artificial do tipo mapa de características auto-organizáveis pode gerar aproximações de grupos de dados, aproximações estas que suavizam os ruídos.

Com base nestas características, neste trabalho escolheu-se utilizar uma técnica de inteligência artificial para construir um sistema de identificação e classificação de transitórios.

O módulo de IA do sistema de identificação e classificação de transitórios utilizou uma técnica derivada do que é proposto em [16], que consiste basicamente em treinar no mínimo duas RNAs, uma para os transitórios normais de operação e regime permanente, e outra contendo os transitórios anormais.

1.4. Trabalhos Correlatos

Há vários anos foi iniciado o desenvolvimento dos conceitos de "reatores avançados", prevendo novos aperfeiçoamentos tecnológicos, elevada padronização, redução na demanda de controle, minimização da demanda de suprimento de energia elétrica de emergência, e utilização de conceitos de sistemas de supervisão e controle mais robustos, objetivando, entre outras coisas, a imunidade a falhas.

No que se refere à identificação e classificação de transitórios, alguns trabalhos recentes como [35] e [36] abordam este problema utilizando redes neurais artificiais, cujo aprendizado é do tipo supervisionado, diferentemente da abordagem utilizada neste trabalho, que utiliza redes neurais artificiais com aprendizado não-supervisionado.

No ano de 1994, iniciou-se no IPEN, algumas pesquisas no campo de RNAs para controle, em específico com o desenvolvimento de uma nova arquitetura, buscando contribuir para o desenvolvimento de novos sistemas de

controle para instalações de reatores nucleares avançados e para robótica. Os conceitos introduzidos com essa arquitetura foram baseados no projeto de redes dedicadas à tarefa, na utilização de múltiplos contatos sinápticos com uma nova função de transferência, e no uso de processos de modificação de forças de ligação sináptica similares aos encontrados em organismos biológicos.

Além de ser testado no controle de um sistema termo-hidráulico de reatores avançados, esse novo conceito foi utilizado no controle de posição e trajetória de um manipulador robótico bi-articulado no plano. Nessa tarefa, uma RNA MULSY [20] foi comparada com um modelo clássico de RNA-AA, mostrando desempenho muito superior, em termos de capacidade de generalização e rapidez de treinamento, que foi cerca de 150 vezes melhor que o da RNA-AA. Os resultados mostraram uma precisão de posicionamento até 60 vezes maior. Ao término dessa etapa, novas aplicações foram desenvolvidas, inclusive utilizando mapas auto-organizáveis. A relação de trabalhos publicados está nas referências [20] e [24-31].

Na linha de reatores de novas gerações, em especial para o Reator IRIS, diversos trabalhos de desenvolvimento e análise foram feitos. Como uma das principais atividades, deve ser citada a participação no Consórcio Internacional para desenvolvimento do IRIS, coordenada pela Westinghouse e que conta com a participação de vinte e duas organizações de nove países. Nesse projeto já foram iniciados alguns estudos de uma concepção preliminar de um sistema de identificação de transitórios. Um estudo preliminar foi publicado no GENES4/ANP2003 Sept. 15-19,2003 em Kioto, Japão [33] e no GLOBAL 2003 [34]. Nesse estudo foram levados em consideração alguns transitórios como, variações de aumento e diminuição de potência em rampa e em degraus, desligamento imprevisto do reator, abertura inadvertida da válvula de alívio e um degrau artificial de 50% da potência nominal. A Figura 3 exemplifica a resposta de pressão obtida quando é aplicado um degrau de redução da potência de 100% para 90%.

O sistema de identificação concebido considera que poucas variáveis podem caracterizar univocamente um transitório. Por exemplo, pode-se considerar: as potências, do reator e do secundário, a temperatura em diversos pontos e a pressão, temperatura e nível do pressurizador. O sistema tem um

buffer para coleta de alguns segundos de dados das principais variáveis que são usadas como entrada para o SOM. O conceito está esquematizado no diagrama da Figura 4.

Os resultados de alguns testes que foram realizados estão apresentados na Figura 5. Na Figura 6 está exposto um dos resultados obtidos quando a simulação ocorreu com dados da usina de Angra I. Ambas as figuras representam a camada de saída do SOM. As setas da Figura 5 indicam a ordem em que as unidades de saída do SOM foram ativadas, quando apresentados os transitórios, que por sua vez estão indicados através de cores, e identificados nas legendas do lado esquerdo da mesma figura. Já a Figura 6 separa através das linhas vermelhas regiões definidas pelo SOM após o seu treinamento inicial. Estas regiões indicam o tipo de transitório em curso, através do rótulo da região da qual a unidade de saída que for ativada pertencer.

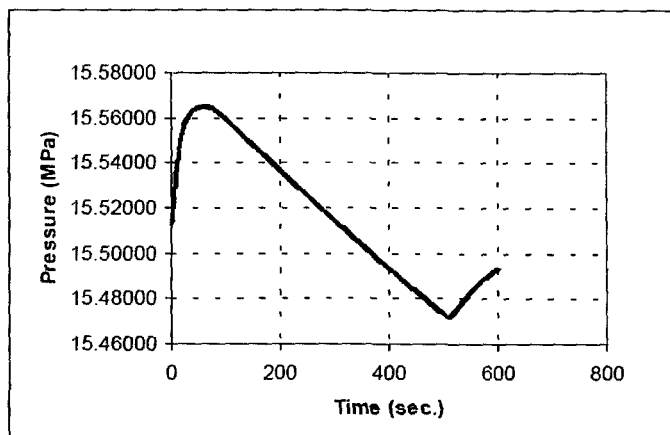


Figura 3 - Resposta da pressão em um degrau de potência de 100% a 90%.

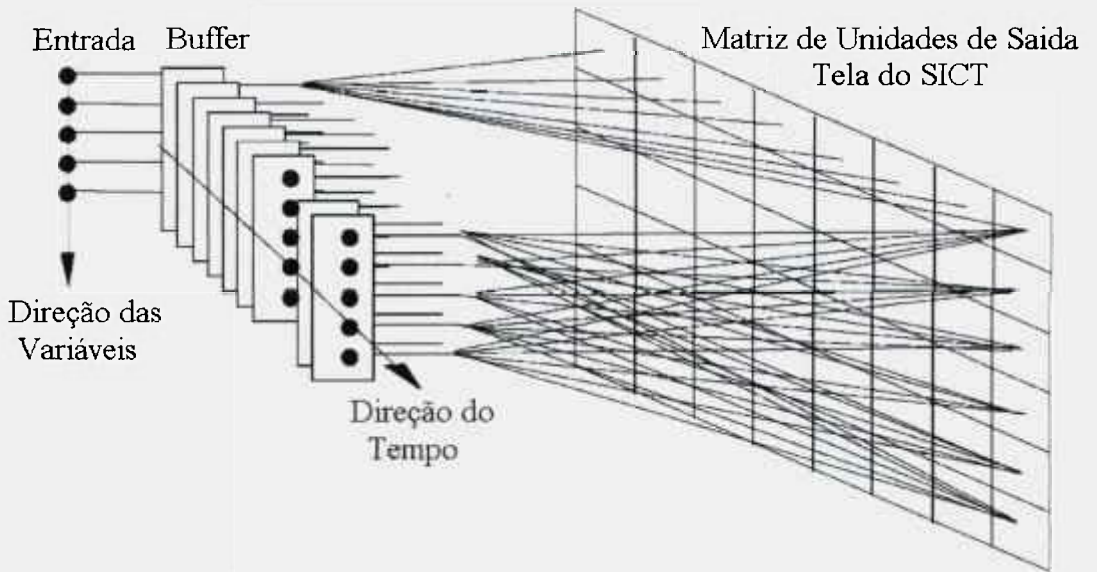


Figura 4 – Sistema de Identificação baseado no SOM.

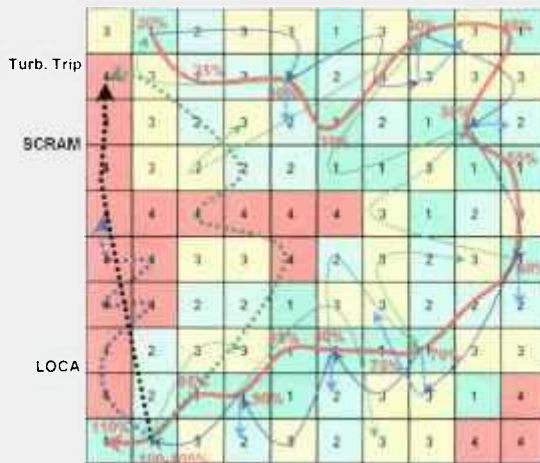


Figura 5 - Testes iniciais do SOM.

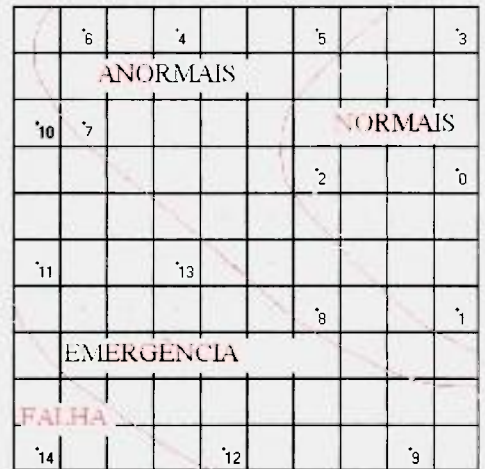


Figura 6 – Testes com dados de Angra 1.

Estes resultados também foram publicados em [32], juntamente com algumas propostas para o presente trabalho.

2. OBJETIVO

Neste trabalho pretende-se construir um sistema de identificação e classificação de estados transitórios de um sistema termo-hidráulico, com o objetivo de sua aplicação em futuros projetos de reatores nucleares.

Este sistema deve ser feito utilizando técnicas de inteligência artificial, mais especificamente redes neurais artificiais do tipo mapas de características auto-organizáveis (SOM), utilizando uma abordagem em que cada estado transitório possui uma rede especializada nele. A identificação e classificação devem ocorrer através de uma competição entre as redes.

O sistema construído neste projeto deve utilizar uma base de dados obtida via experimentação, em uma bancada de circulação natural, onde é possível simular os estados transitórios que o sistema deve identificar e classificar.

As informações apresentadas pelo sistema devem ser de fácil compreensão, e apresentar medidas de confiabilidade, para que os operadores possam absorver rapidamente tais informações e aplicá-las como for necessário no controle do reator nuclear.

3. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

3.1. As Redes Neurais Artificiais

Os diversos tipos de RNAs possuem capacidades como, por exemplo, aproximação de funções, criarem representações de conjuntos de dados, identificação e classificação de padrões. Tendo em conta essas características e o estado de desenvolvimento destas técnicas, optou-se por usá-la para o desenvolvimento do sistema de identificação e classificação de transitórios.

O campo das RNAs está presente em vasta literatura voltada para as mais diversas aplicações. Inspirada na neurociência, a teoria tem evoluído principalmente com base na investigação de matemáticos e engenheiros. Uma característica que torna muito atrativa a aplicação das RNAs é que o seu processamento é paralelamente distribuído. Em outras palavras, uma RNA possui diversos processadores, que funcionam simultaneamente, e interagem entre si com o propósito de gerar resultados.

A arquitetura que define a interação entre os processadores, e a maneira em si de como esta interação ocorre, é que determina a qualidade dos resultados. Este processamento paralelamente distribuído, com as várias possibilidades de configurações diferentes de interação entre os processadores, pode tornar o sistema neural, quando bem projetado, mais ágil no processamento de dados em comparação com sistemas que utilizam modelos físicos analíticos, e com a capacidade de processar não linearmente estes dados.

Uma RNA é formada de elementos processadores que algumas vezes são explicados utilizando analogias aos neurônios biológicos, devido a algumas características essenciais de tais elementos, como suas interligações (sinapses) e especializações. Duas são as características que podem ser utilizadas para fazer estas analogias: 1) o conhecimento é adquirido pela rede através de um processo de aprendizado, que leva à capacidade de generalização, e 2) as intensidades das ligações entre os elementos (neurônios), chamadas de pesos sinápticos, são usadas para armazenar esse conhecimento adquirido. O processo que promove a aquisição e armazenamento do conhecimento é chamado de "processo de

aprendizado”. Através do aprendizado a RNA “aprende” a desempenhar uma função para a qual é projetada. Assim, o treinamento é capacitar a rede a associar padrões, reconhecer padrões, controlar processos, filtrar informações, formar feixes ou aproximar funções.

Existem diversas classes de RNAs em função de sua arquitetura, funções de transferência ou mesmo processos de treinamento. Redes que precisam de um “professor”, ou seja, aprendem com base em exemplos, são classificadas como “redes de aprendizado supervisionado”, exemplo destas são as redes alimentadas adiante treinadas com o algoritmo de retro-propagação. Outra forma utilizada é a de “aprendizado por reforço”, quando não existem valores certos, mas se tem a noção precisa do que é fracasso ou sucesso. Para a extração de características de padrões, passo importante para sua classificação, existe um tipo de RNA que trabalha por si só, ou seja, sofre um “treinamento puramente não-supervisionado” ou “aprendizado sem professor”, que se comporta muito bem neste tipo de tarefa. É este o tipo de RNA considerado neste projeto, em especial os conhecidos “Mapas de Características Auto-Organizáveis”, os SOM de Teuvo Kohonen [14]. O SOM foi apresentado por Kohonen na década de 80 e desde então o uso dessa técnica tem se expandido por diversas áreas conforme se pode depreender da vasta lista de artigos referenciados por Oja et alli [21] que foram publicados entre 1998 e 2001 e por tantos outros trabalhos relacionados com o SOM e também citados na mesma referência. Dentre os trabalhos da referência [21], destacam-se no campo de monitoramento de processos, como processos industriais e químicos, que caracteriza a área de aplicação deste projeto, os trabalhos [37], [38] e [39]. Outros trabalhos, como [40] e [41] referem-se especificamente à tarefa de diagnóstico, todos utilizando SOM.

Os SOMs possuem uma estrutura topológica, chamada de camada de saída, que possui neurônios que se relacionam ao chamado livro de códigos, que por sua vez 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.

As respostas de um SOM são obtidas comparando todos os códigos do livro de códigos com o “estímulo” de entrada, e, quando localizado o código mais similar ao estímulo apresentado, obtém-se o seu neurônio correspondente na camada de saída. Este neurônio, ou unidade, é chamado comumente na literatura de Mapas Auto-Organizáveis de BMU (*Best Matching Unit* – Unidade Melhor Casada, em tradução livre) [19].

4. METODOLOGIA

Este projeto pode ser dividido em três módulos: aquisição de dados, RNAs configuradas de maneira ótima para a tarefa de identificação e classificação, e a implantação fazendo a integração com a interface com o usuário.

Cada módulo é peculiar em seu formato e objetivo dentro do projeto. Para explicar de maneira melhor tais formatos e objetivos, devemos analisar cada um dos módulos separadamente.

4.1. Aquisição de Dados

O módulo de aquisição de dados é feito em plataforma Labview, utilizando a já construída integração com a bancada de circulação natural. Uma vantagem de se utilizar esta plataforma, é a sua capacidade de integração com DLLs (*Dinamic Linked Libraries* – Bibliotecas Ligadas Dinamicamente), que, por sua vez, serão utilizadas para acoplar o módulo das RNAs ao sistema.

Uma bancada de circulação natural foi utilizada, pelo autor desta dissertação, para realizar os experimentos deste projeto, com o objetivo de averiguar o comportamento do sistema de identificação e classificação com dados experimentais, e não gerados por modelos matemáticos e computacionais.

As variáveis fornecidas pela aquisição de dados são:

- Temperatura em vários pontos do circuito;
- Pressão do sistema primário;
- Vazão do sistema primário;
- Vazão do sistema secundário;
- Potência do aquecedor;
- Tensão do sinal enviado ao aquecedor.

As variáveis potência e tensão do sinal enviado ao aquecedor não foram utilizadas, dado que a sua utilização anularia um dos objetivos do sistema, que é justamente detectar variações de potência.

4.1.1. A Bancada de Circulação Natural

A bancada de circulação natural, pertencente à diretoria de reatores do IPEN e esquematizada na Figura 7, tem por objetivo desenvolver pesquisas e oferecer serviços para:

- Estudo do comportamento de resfriadores de sistemas passivos de remoção de calor residual típicos de reatores avançados e reatores navais, em escala reduzida;
- Análise do comportamento operacional de sistemas passivos de remoção de calor residual com linhas de desvio da fonte térmica;
- Pesquisa e desenvolvimento de redes neurais artificiais para controle de sistemas de reatores nucleares e
- Utilização de redes neurais artificiais para diagnóstico e previsão de comportamento de sistemas de reatores nucleares.

Na Figura 7, o azul representa o sistema primário, e o verde o sistema secundário.

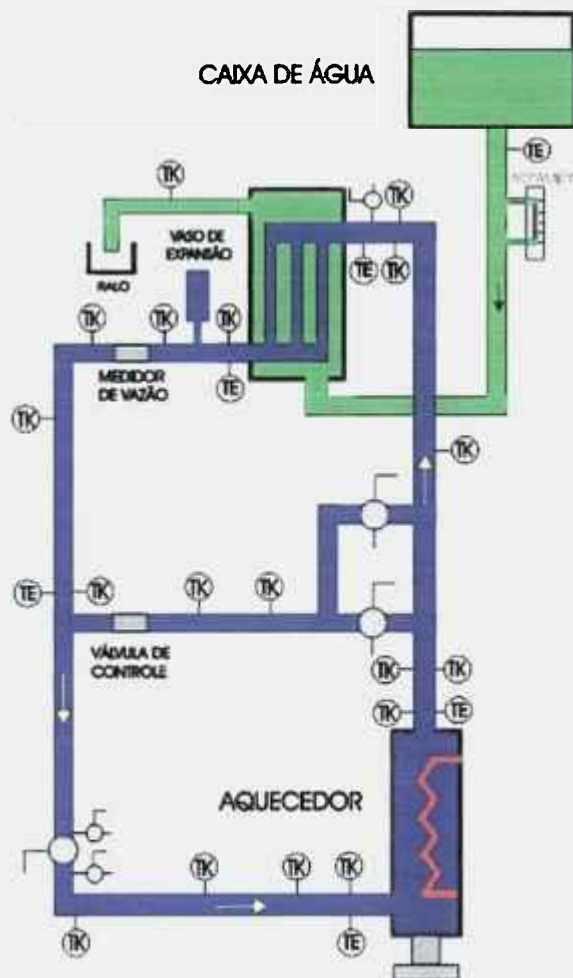


Figura 7 – Diagrama esquemático da Bancada de Circulação Natural

A seguir, algumas imagens e suas respectivas descrições da bancada.

4.1.1.1. Aquecedor

Aquecedor tipo elétrico (Figura 8), de passagem, construído em tubo e conexões de aço inoxidável, equipado com resistência tubular de imersão com flange, elementos tubulares blindados, termostato de segurança.



Figura 8 – Aquecedor da Bancada de Circulação Natural

4.1.1.2. Trocador de Calor

O Trocador de Calor (Figura 9) foi concebido com base em resfriadores de aplicação naval e conceitos considerados no AP - 600. É construído totalmente em cobre.



Figura 9 – Trocador de Calor da Bancada de Circulação Natural

4.1.1.3. Instrumentação

Para as medidas de temperatura estão disponíveis 19 termopares do tipo K, instalados na parede dos tubos de cobre e 5 do tipo T, instalados diretamente no fluido.

A medida de vazão no primário é feita por meio de um medidor de vazão tipo magnético com transmissor de 4 a 20 mA.

No secundário, a vazão é ajustada na faixa de 25 a 250 l / h e medida por meio de um rotâmetro.

Na linha de desvio está instalada uma válvula de esfera com atuador motorizado.

Para a caracterização hidráulica dos diversos trechos da Bancada são utilizadas 4 tomadas de pressão e um manômetro tipo U invertido.

4.1.1.4. Controle

O sistema de controle da bancada (Figura 10) possui como base uma plataforma PC, com placa de aquisição de dados com 8 entradas diferenciais analógicas (16 entradas com terra comum), sinal de entrada de - 10 a + 10 V, selecionável por software, 8 entradas / saídas digitais, taxa de amostragem 100 KS / s, 2 saídas analógicas no intervalo de - 10 a + 10 V configurável via software, resolução (I/O) melhor ou igual a 12 bits, com contador / temporizador disponível para acesso a leitura. O sistema é interligado a uma eletrônica de controle de potência do aquecedor que fornece uma potência de até 3.300 W. É equipada com conversor eletrônico de voltagem para garantir a estabilidade da tensão nos equipamentos. O sistema desenvolvido permite ainda a abertura / fechamento da válvula de desvio.



Figura 10 – Sistema de Controle da Bancada de Circulação Natural

4.1.2. Transientes Tratados

A escolha dos transitórios a serem identificados e classificados pelo sistema foi feita considerando a disponibilidade técnica, isto é, quais transitórios podem ser simulados na bancada de circulação natural, como também na semelhança destes com os transitórios normais na operação de um reator nuclear real, e com os transitórios anormais de um reator nuclear real.

Segue a relação de estados obtidos via experimentação:

Estados normais de operação:

- Aquecimento;
- Resfriamento;
- Regime permanente;

- Rampas;
- *Steps*.

Estados anormais de operação:

- Abertura de uma linha de desvio no sistema primário;
- Bloqueio de vazão no sistema primário;
- Bloqueio de vazão no sistema secundário.

Desta maneira, 8 (oito) estados foram adquiridos, onde 5 (cinco) são importantes pois devem ser identificados por sua natureza transitória. São eles: as rampas, *steps*, abertura de linha de desvio no sistema primário, bloqueio de vazão no sistema primário e bloqueio de vazão no sistema secundário. Cada um corresponde a uma “classe”, como é comumente chamado na literatura de redes neurais.

4.1.3. Plano de experimentos

Os experimentos feitos na bancada de circulação natural ocorreram em diversos dias, dada a grande inércia do sistema no que diz respeito a responder a mudanças de parâmetros como potência, vazão, entre outros. Os experimentos feitos com os transitórios de bloqueio de vazão do primário, bloqueio de vazão do secundário e abertura de linha de desvio no sistema primário foram feitos duas vezes, sob condições diferentes, para induzir uma maior capacidade de generalização das RNAs quando estas foram treinadas. Cada um dos experimentos durou no mínimo seis horas, sendo que cada um deles foi feito individualmente por dia. De todos estes experimentos, que totalizaram seis, foram extraídos dados dos estados de aquecimento, regime permanente e resfriamento.

Os experimentos foram conduzidos aumentando a potência do aquecedor de 0 (zero) até uma potência, em Watts, específica de cada experimento. Dependendo da potência, os experimentos de transitórios foram selecionados de uma maneira conveniente. Na Tabela 1 estão detalhes destes experimentos, orientados aos parâmetros utilizados. Na coluna “Transitório Simulado”, as siglas BVP, ALDP e BVS significam respectivamente: bloqueio de vazão do sistema primário, abertura de linha de desvio no sistema primário e bloqueio de vazão do secundário.

Tabela 1 – Descrição detalhada dos experimentos BVP, ALDP e BVS

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

Os experimentos que reproduziram os estados de *steps* e rampas foram feitos duas vezes cada um, durante dois dias. Dados de aquecimento e resfriamento também foram retirados destes experimentos. A Tabela 2 contém os detalhes destes experimentos.

No caso dos *steps*, a coluna “Variação de Tempo” indica o intervalo de tempo entre um *step* de 500W e outro. Já no caso das rampas, a mesma coluna indica o tempo que a potência demora para subir 500W.

Tabela 2 – Descrição detalhada dos experimentos de rampa e step

Experimento	Variação de Tempo	Tipo de Transitório
1	10 min	<i>Step</i>
2	10 min	Rampa
3	20 min	<i>Step</i>
4	20 min	Rampa

Todos os experimentos foram feitos alterando as potências de 0W a 500W, 1000W, 1500W, 2000W e 2500W de maneira crescente e então decrescente, através dos intervalos de tempo especificados, sempre com vazão de 60 l/h no sistema secundário.

Após a realização destes experimentos, os dados foram organizados de acordo com as suas respectivas classes. Os dados da classe do estado de Regime Permanente foram selecionados de todos os dados coletados, quando em momentos pós-aquecimento, onde o coeficiente angular da regressão linear

dos dados dos diversos *buffers*, de cada dimensão, estavam no intervalo $[-0,030, 0,030]$.

Os *buffers* de dados consistem nos aglomerados formados pelos dados das diversas variáveis acumulados em um certo período de tempo. Desta forma, um dos parâmetros importantes a ser ajustado é o tamanho ideal do *buffer*, em termos de tempo, utilizado para determinar o estado atual do reator. Nos experimentos, foram utilizados 4 *buffers* diferentes, sendo eles de: 5, 9, 13 e 18 períodos de 7 segundos. A ilustração abaixo explica de maneira simplificada esta estrutura:

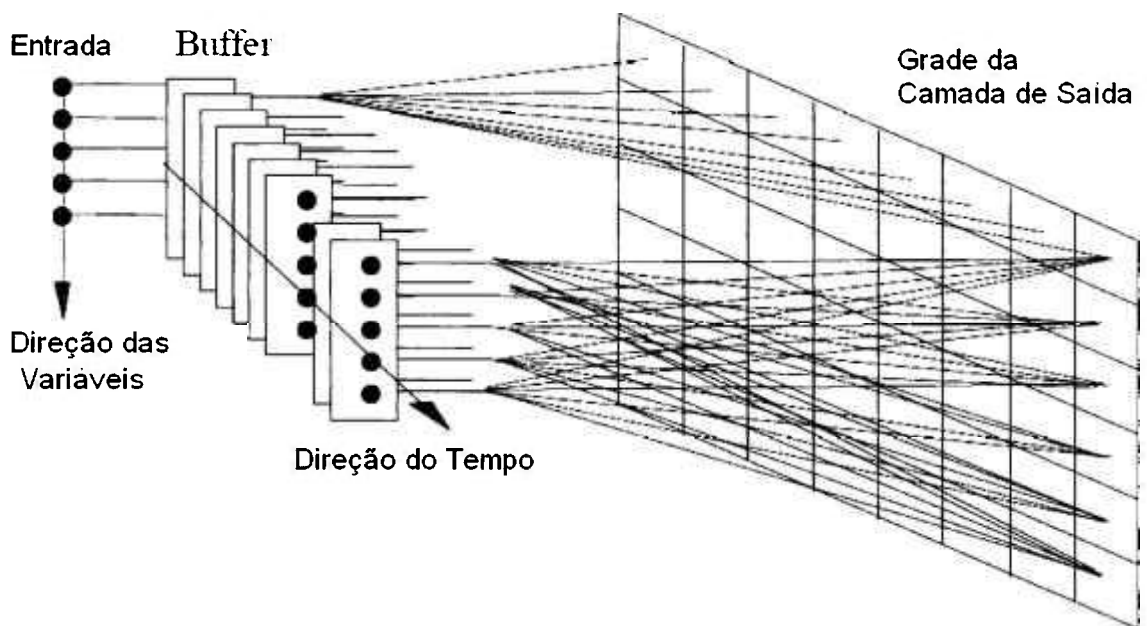


Figura 11 – lustração didática da estrutura dos dados

Após esta fase de organização, os dados estão prontos para serem apresentados ao processo de treinamento.

4.2. Redes Neurais Artificiais

As redes neurais artificiais utilizadas neste trabalho são as redes do tipo mapas de características auto-organizáveis, ou, como normalmente são chamadas na literatura, *Self-Organizing Maps* (SOM) ou ainda *Self-Organizing Feature Maps* (SOMF).

Para formar o módulo de RNAs, é necessário efetuar o treinamento de diversas redes “candidatas”, sendo que as redes “eleitas” são escolhidas

utilizando duas técnicas autônomas de avaliação de desempenho. Por fim, são gerados os semáforos, que são as medidas de confiabilidade do sistema.

4.2.1. Treinamento

A abordagem utilizada neste trabalho, que é uma expansão do conceito proposto em [16], consiste em: para cada tipo de transitório a ser identificado e classificado pelo sistema há uma RNA especializada nele, como exposto na Figura 12.

O módulo de RNAs foi acoplado ao sistema implantado em Labview utilizando uma DLL (ver seção 4.1), após a definição da configuração ótima das RNAs (Redes Neurais Artificiais) do tipo SOM.

A definição da configuração ótima das RNAs foi feita utilizando o software Matlab. Após a definição, as informações referentes ao conhecimento das RNAs (livros de códigos e respectivas classes das RNAs) foram armazenadas em arquivo texto, para então serem lidas e modificadas pelas DLLs utilizadas no sistema, que contém os algoritmos de BMU (*Best Matching Unit* – unidade do livro de códigos com a menor distância euclidiana do dado de entrada).

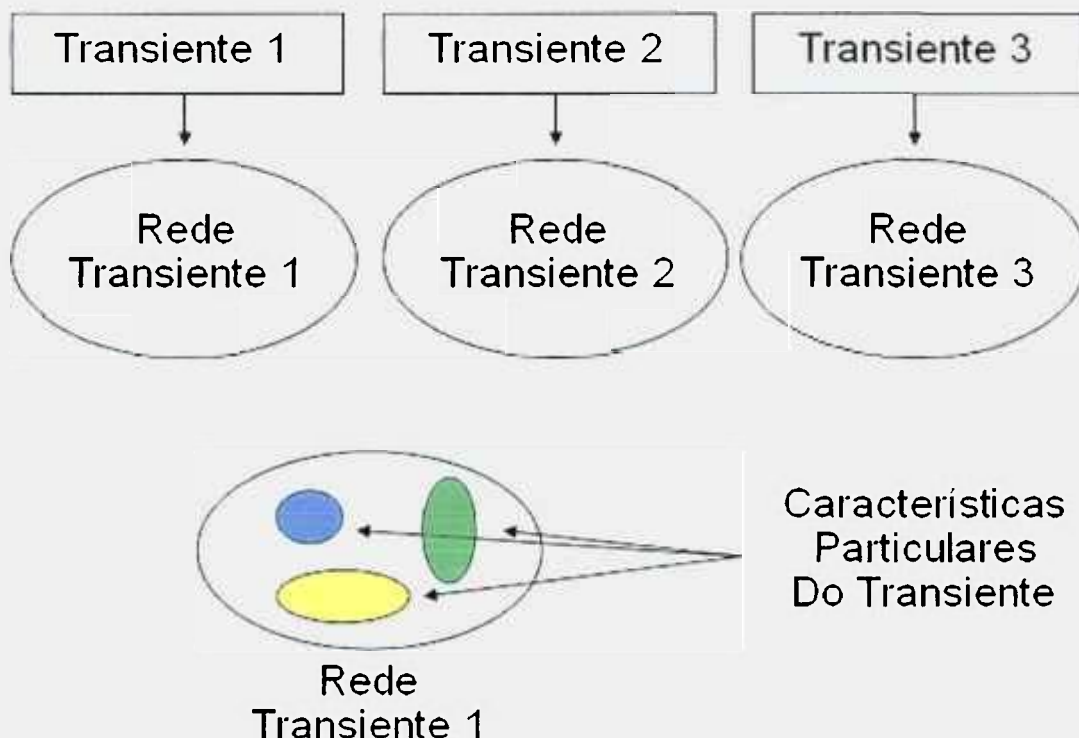


Figura 12 – Abordagem do tipo “Redes Especialistas”

A identificação dos transitórios é feita através de uma medida de confiabilidade, fornecida pelas redes SOM quando uma classificação é realizada, chamada de erro de quantização, que é a distância euclidiana da BMU para o dado de entrada, sendo que a rede que apresentar o menor erro de quantização será a rede vencedora. A classe (tipo de estado transitório) da rede vencedora será o resultado da classificação, como mostrado na Figura 13. A vantagem da utilização desta técnica é um maior refinamento do resultado, como também do erro de quantização, o que otimiza a análise de confiabilidade que também é fornecida pelo sistema.

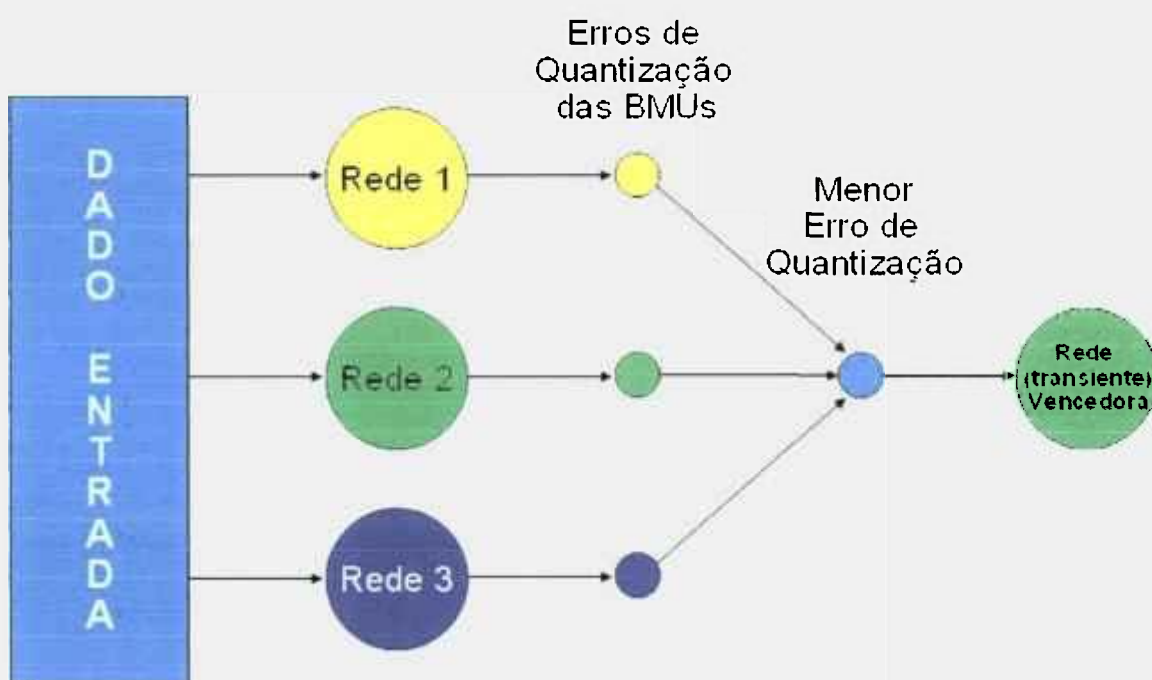


Figura 13 – Esquema ilustrativo da Identificação e Classificação

A busca pela melhor combinação de RNAs envolve o treinamento de diversas RNAs sob configurações diferentes, e então na avaliação de todas as combinações destas, medindo a quantidade de padrões classificados corretamente.

O processo de treinamento se subdivide em três partes: subdivisão dos conjuntos para a utilização do método de treinamento *cross-validation* [17] (que será exposto logo adiante), pré-processamento, apresentação às redes em diversos parâmetros.



Figura 14 – Diagrama do método de treinamento

O método de *cross-validation* consiste em dividir os dados disponíveis para treinamento em duas partes: uma que é utilizada efetivamente no treinamento, e o restante que não é utilizado no treinamento, mas somente após o mesmo. Após o término do treinamento, a RNA pára de se adaptar aos estímulos de entrada, respondendo somente apresentando a BMU e o erro de quantização correspondente, e não mais ajustando o seu livro de códigos.

O conjunto de validação, como é chamado o conjunto de dados não apresentados durante o treinamento da rede, é utilizado para avaliar o desempenho da RNA para dados “desconhecidos” a ela, o que permite avaliar a sua capacidade de generalização. E ainda, com os mesmos dados disponíveis, é possível rearranjar esta divisão em pontos diferentes do conjunto, como indica a Figura 15, para que o treinamento seja feito utilizando todos os dados disponíveis, porém várias vezes e separadamente.

Neste projeto, as subdivisões foram feitas reservando 80% dos dados disponíveis ao treinamento, e os 20% restantes à posterior validação da rede, rearranjando as divisões como na Figura 15. Os blocos brancos representam os conjuntos de treinamento, e os verdes os conjuntos de validação. Desta forma, todos os dados disponíveis são apresentados à mesma metodologia de treinamento, para avaliá-la.

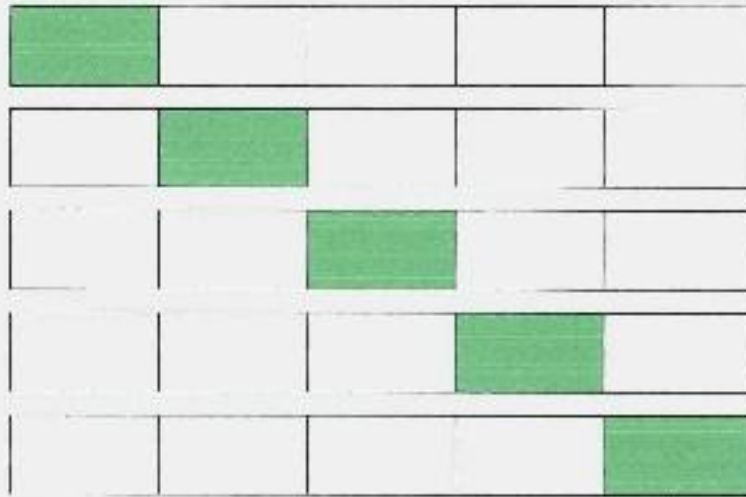


Figura 15 - Arranjos feitos para as divisões dos dados

A fase de pré-processamento consiste em uma normalização vetorial dos dados, isto é, como cada padrão é um vetor, então todos eles terão sua norma igualada à 1.

O treinamento das RNAs foi feito utilizando o assim chamado algoritmo em *batch* [15]. Este algoritmo possui duas características e vantagens que o diferem do algoritmo original proposto por Kohonen: primeiro, ele é muito mais rápido, e segundo, possui um parâmetro de treinamento a menos, como ficará exposto através da explicação a seguir.

Primeiro, faz-se necessário expor o algoritmo original de treinamento do SOM. Este pode ser subdividido em 5 (cinco) passos:

1º - Inicialização: Consiste na escolha de valores iniciais para o livro de códigos do SOM. Estes valores podem ser escolhidos aleatoriamente, ou baseando-se em valores do próprio conjunto de treinamento.

2º - Amostragem: Um padrão é retirado do conjunto de treinamento, para comparação com os códigos do livro de códigos do SOM.

3º - Casamento por Similaridade: Encontra o código que mais se assemelha ao padrão escolhido no passo 2. Esta escolha é feita escolhendo o código de menor distância euclidiana do padrão.

$$i(\mathbf{x}) = \operatorname{argmin}_j \|\mathbf{x} - \mathbf{w}_j\|, j = 1, 2, \dots$$

Onde $i(x)$ é um vetor dos índices dos códigos vencedores do livro de códigos, x é o conjunto de padrões de treinamento, w_j corresponde ao código de índice j . $\text{argmin}_j f(z)$ é a função que encontra o índice j que minimiza a função $f(z)$.

4º - Atualização: atualize os valores de w de acordo com a equação:

$$w_j(n+1) = w_j(n) + \eta(n) * h_{j,i(x)}(n) * (x(n) - w(n))$$

Onde n corresponde à época atual do treinamento, $\eta(n)$ é a taxa de aprendizagem e $h_{j,i(x)}$ é a função de vizinhança, que determina o quão próximo está o neurônio correspondente ao código j do neurônio correspondente ao código i na camada de saída do SOM.

5º - Continuação: Repita do passo 2 até que não hajam mais mudanças significativas.

A taxa de aprendizagem normalmente é uma função cujo valor decai com o aumento de n , o que, por sua vez, representa a passagem do tempo.

Já a função de vizinhança estipula um valor de acordo com a proximidade dos neurônios. Geralmente tem a função de diminuir este valor proporcionalmente à distância e ao tempo, de forma que a função só retorna valores altos para neurônios muito próximos, para um n alto.

Este algoritmo requer um número considerável de épocas para deixar de repetir no passo 5. Já o algoritmo em *batch* requer um número muito menor de épocas, e com mais uma vantagem, não necessita do parâmetro de taxa de aprendizagem.

O algoritmo em *batch* consiste em 4 etapas:

1 - Inicialização: que basicamente pode ser idêntica ao algoritmo original.

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 assemelham 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: Repetição do passo 2 algumas vezes.

Sendo assim, a sua representação matemática fica:

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

Onde q_j é o número de padrões pertencentes ao grupo de similaridade do neurônio correspondente ao código de índice i . j corresponde ao índice dos padrões de entrada.

O passo 4 do algoritmo refere-se à repetição a partir do passo 2. Esta repetição acontece poucas vezes, bem menos do que no algoritmo original. Porém, não se adota aqui uma medida para definir quando devem parar as repetições, e sim, um critério de tentativa e erro, porém com o conhecimento prévio de que enquanto o algoritmo original demanda geralmente mais de 500 épocas, o algoritmo em *batch* costuma obter bons resultados com menos de 50 épocas.

Após este treinamento, os códigos do livro de códigos não são mais alterados, ou seja, após o treinamento, o comportamento da rede, quando apresentada um padrão de entrada, é somente encontrar a BMU e gerar o erro de quantização.

Cada uma das redes foi treinada sob vários parâmetros (configurações) de treinamento diferentes, com a finalidade de testar qual combinação de parâmetros resultaria em um treinamento mais eficaz.

Desta forma, várias redes, com seus livros de códigos “estáticos”, são geradas. Então, faz-se necessário escolher somente uma rede para cada transitório. Esta escolha ocorreu de duas maneiras, utilizando dois métodos de avaliação de desempenho destas redes de maneira autônoma.

4.2.2. Técnicas de avaliação de desempenho das redes neurais

A primeira técnica utiliza uma regra de avaliação, que consiste em uma soma de diversas medidas indicadoras de desempenho das redes, onde quanto menor a soma, melhor o resultado. A outra abordagem é simplesmente avaliar a quantidade de transitórios classificados corretamente, em todos os cruzamentos possíveis, e escolher o cruzamento com a maior taxa de classificações corretas, ou acertos.

Para explanar melhor a técnica de avaliação por meio de medidas de desempenho, segue uma explicação matemática.

4.2.2.1. Função de Medida de Desempenho

Seja E_t o conjunto dos erros de quantização gerados pelas RNAs quando apresentados dados do conjunto de treinamento, e seja E_v o conjunto dos erros gerados quando apresentados dados dos conjuntos de validação, temos:

$$M = \text{MEDIA}(E_t) + \text{MEDIA}(E_v)$$

$$DP = \text{MAX}(\text{MEDIA}(E_t) , \text{MEDIA}(E_v)) / \text{MIN}(\text{MEDIA}(E_t) , \text{MEDIA}(E_v))$$

$$DPP = D(E_t) / \text{MEDIA}(E_t) + D(E_v) / \text{MEDIA}(E_v)$$

Onde $\text{MEDIA}(A)$ representa a média dos valores do conjunto A , $\text{MAX}(a , b)$ retorna o maior dos valores, a ou b , $\text{MIN}(a , b)$ retorna o menor dos valores, a ou b , e $D(A)$ retorna o conjunto de desvios padrões de A .

M é a soma das médias dos erros de quantização dos conjuntos, DP é a soma das diferenças proporcionais das médias e DPP é a soma das diferenças dos desvios padrões proporcionais.

O algoritmo de avaliação seleciona a rede que minimizar a equação:

$$E = M * DP + DPP$$

O parâmetro DP é multiplicado ao parâmetro M , pois, por se tratar de uma diferença proporcional, a sua magnitude pode influenciar no resultado de forma que ele se torne um fator predominante, por sua capacidade de se tornar muito maior, em alguns casos, que os demais fatores. Sendo assim, com sua multiplicação por M , a sua magnitude é levada a níveis semelhantes aos de M , o que é desejado, dado que a magnitude de M é importante na avaliação, e não a magnitude de DP .

Os parâmetros variados durante o treinamento são: tamanho de buffer (tempo), tamanho da grade da camada de saída, épocas, tipo da malha (hexagonal e quadrada), tipos de inicialização (randômica ou com os dados iniciais do conjunto de dados) e os tamanhos iniciais e finais da vizinhança da camada de saída.

Após cada treinamento, estes parâmetros são refinados de forma a se aproximarem dos parâmetros ótimos.

Pretende-se, desta maneira, gerar redes especializadas na classe a qual elas representam, e, assim, que elas ganhem das demais redes quando o padrão a ser reconhecido se trate do padrão correspondente à sua classe.

4.2.2.2. Produto Cartesiano

Para cada transitório, existe um conjunto de tamanho N de redes neurais especialistas, cada uma representando uma combinação diferente de parâmetros de treinamento. Seja M a quantidade de transitórios tratados. Então, temos $N \times M$ redes neurais, sendo que somente M redes devem existir no sistema (uma para cada transitório). Para selecionar estas M redes, o desempenho geral do sistema é avaliado para cada combinação de cada uma das N redes de cada transitório com as N redes dos demais transitórios, gerando assim, via produto cartesiano, N^M combinações de M redes "candidatas".

4.2.3. Semáforos

Os semáforos são usados para apresentar uma medida de confiabilidade da informação fornecida. Para manter a abordagem deste trabalho, que é apresentar sempre informações de fácil compreensão ao usuário, esta medida de confiabilidade é apresentada emprestando o conceito comum dos semáforos de trânsito: através de 3 valores diferentes: verde (dados confiáveis), amarelo (requerem verificação), e vermelho (não confiáveis).

Para escolher entre um destes 3 valores, o sistema utiliza o erro de quantização gerado pela resposta da rede vencedora. Três intervalos são definidos, para cada uma das redes, quando o treinamento das mesmas é terminado. Estes intervalos estão ilustrados na Figura 16. Para interpretar corretamente a figura, segue a sua explicação.

O termo “Média Conjunto Validação” indica a média dos erros de quantização gerados quando os dados do conjunto de validação é apresentado à rede, “Média Conjunto Treinamento” é a média dos erros de quantização gerados pela rede quando o conjunto de treinamento é apresentado à rede. Os termos “Desvio Padrão” se referem ao desvio padrão dos erros de quantização dos dados do mesmo conjunto ao qual o desvio é somado.

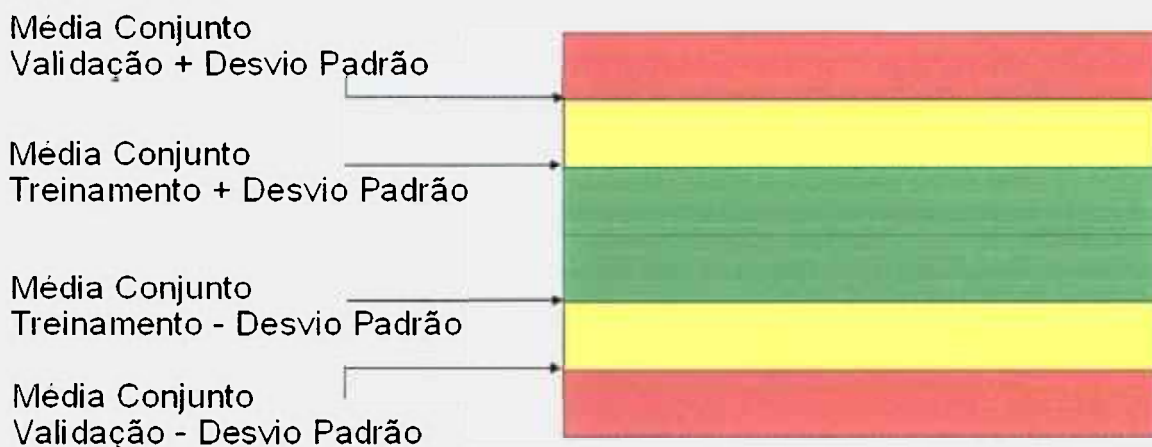


Figura 16 - Intervalos utilizados pelos semáforos

Os resultados são classificados de acordo com a região onde se situarem os erros de quantização, se na região verde, sinal de cor verde, região amarela indica no semáforo o amarelo e região vermelha em diante, sinal vermelho.

4.3. Interface com o Usuário

O módulo de interface com o usuário também foi implementado em Labview, dada a familiaridade dos potenciais usuários do sistema com esta ferramenta, como também por detalhes estruturais, como, por exemplo, a eliminação da necessidade de integração do sistema com uma terceira plataforma, dado que o módulo de aquisição e a interface são ambas implementadas em Labview.

O sistema apresenta uma medida de confiança de uma forma facilmente compreensível. Utilizou-se a média dos desvios padrões dos erros de quantização dos dados de treinamento apresentados à rede. As respostas residentes na área entre a média e mais ou menos o desvio padrão foram

consideradas respostas confiáveis, e fora disso, duvidáveis. Pôde-se utilizar ainda uma segunda medida, que é a média dos desvios padrões dos dados que se sabe pertencer àquele SOM, dada a sua classe, mas que, porém, não foram apresentados à RNA durante o treinamento.

Estes resultados são apresentados de maneira gráfica e facilmente compreensível aos operadores dos reatores nucleares. A interface com o operador (usuário) exibe a classificação de confiabilidade da informação na forma de um semáforo, onde através das cores com as quais estamos acostumados a interpretar de maneira intuitiva são representadas as escalas de confiabilidade.

5. RESULTADOS

Dois tipos de experimentos fazem-se necessários para a avaliação da metodologia escolhida: experimentos de aquisição de dados e experimentos computacionais de avaliação de diversas RNAs candidatas.

5.1. Aquisição de Dados

Da Figura 17 à Figura 34 estão expostas as leituras de medidores de temperatura, nos locais indicados nos títulos destas figuras, sendo que os momentos das transições de estados estão indicados através da linha verde. Mais resultados podem ser visualizados no Apêndice II.

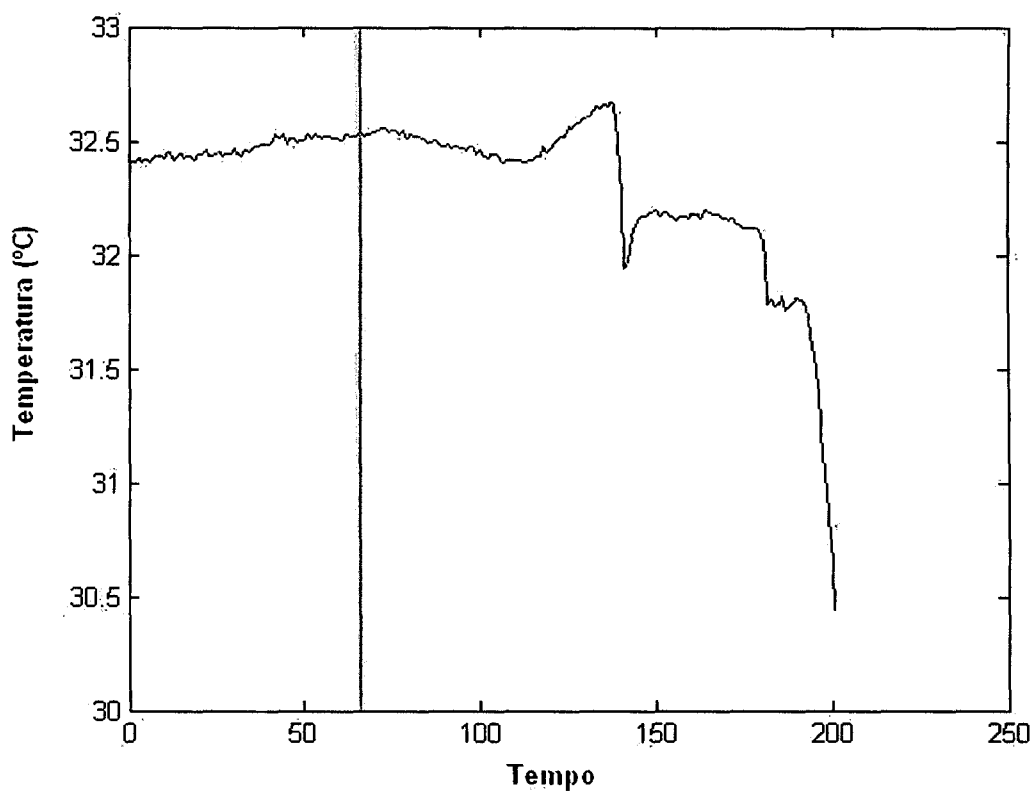


Figura 17 – Bloqueio de Vazão no Sistema Primário a 1000W e vazão do secundário a 60l/h– Entrada do Aquecedor

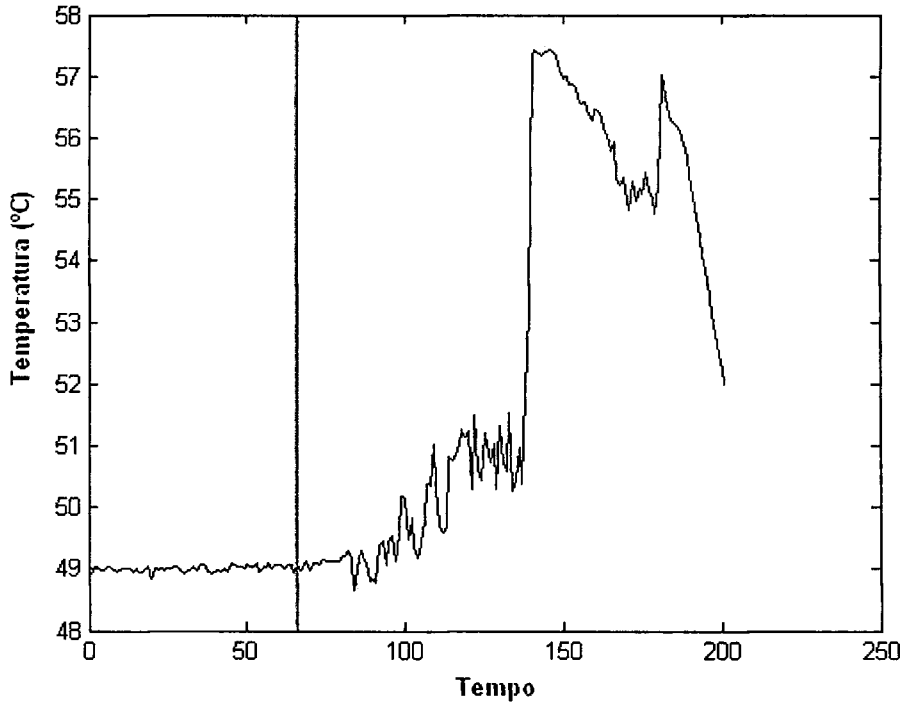


Figura 18 – Bloqueio de Vazão no Sistema Primário a 1000W e vazão do secundário a 60l/h – Saída do Aquecedor

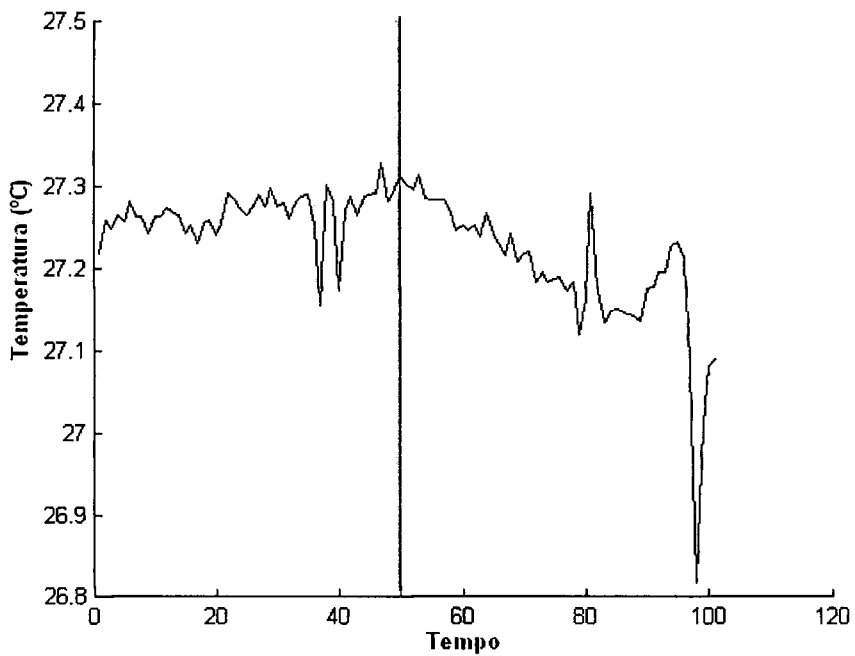


Figura 19 – Bloqueio de Vazão no Sistema Primário a 1000W e vazão do secundário a 120l/h – Entrada do Aquecedor

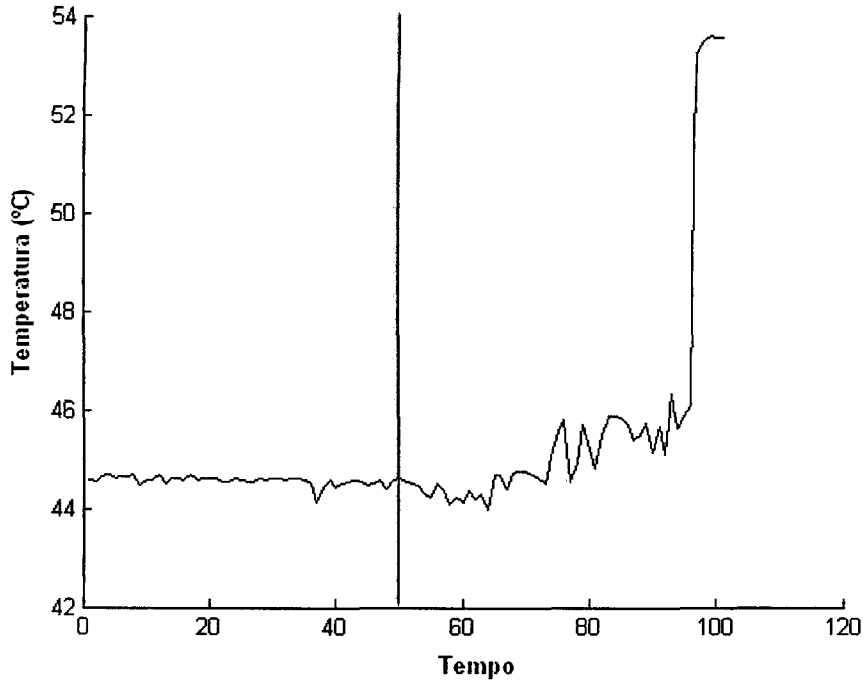


Figura 20 – Bloqueio de Vazão no Sistema Primário a 1000W e vazão do secundário a 120l/h – Saída do Aquecedor

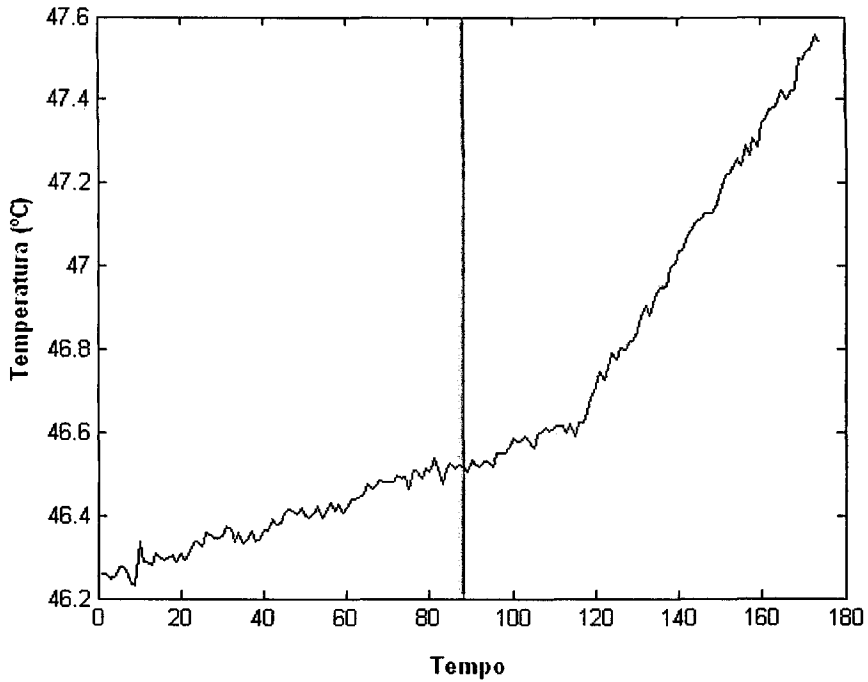


Figura 21 – Bloqueio de Vazão no Sistema Secundário a 2500W e vazão no secundário a 60l/h – Entrada do Aquecedor

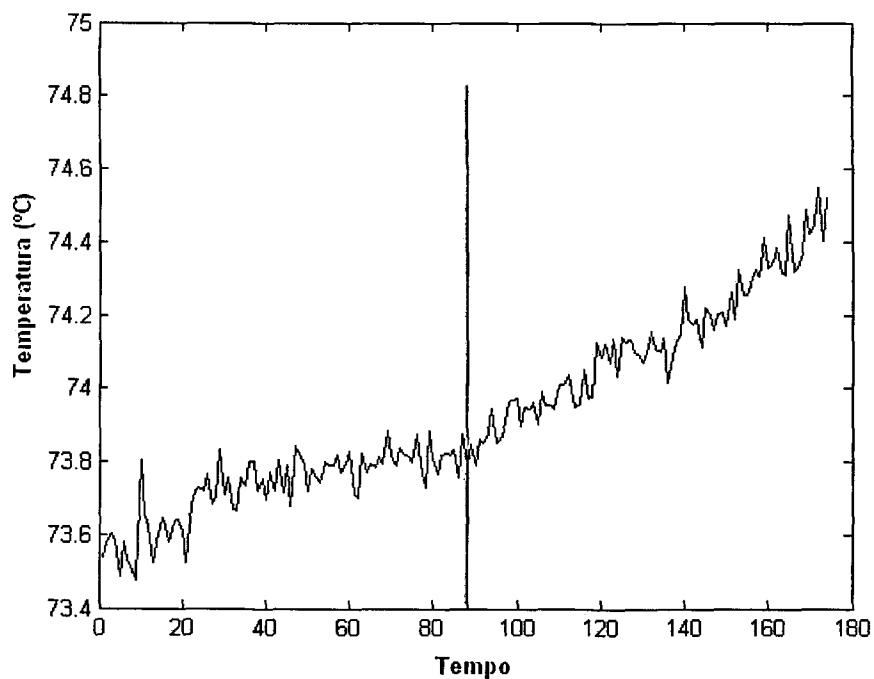


Figura 22 – Bloqueio de Vazão no Sistema Secundário a 2500W e vazão no secundário a 60l/h – Saída do Aquecedor

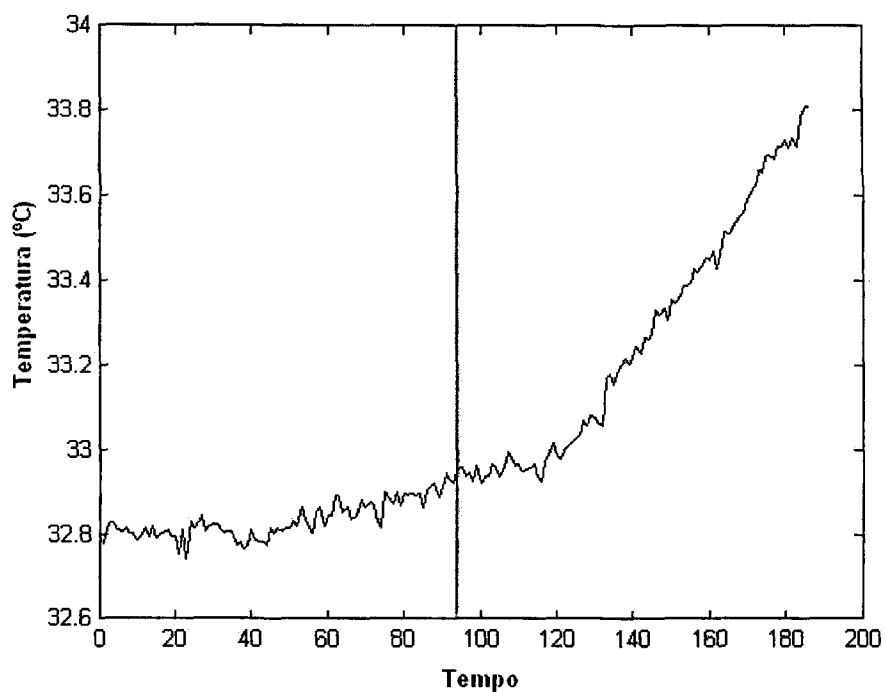


Figura 23 – Bloqueio de Vazão no Sistema Secundário a 2500W e vazão do secundário a 120l/h – Entrada do Aquecedor

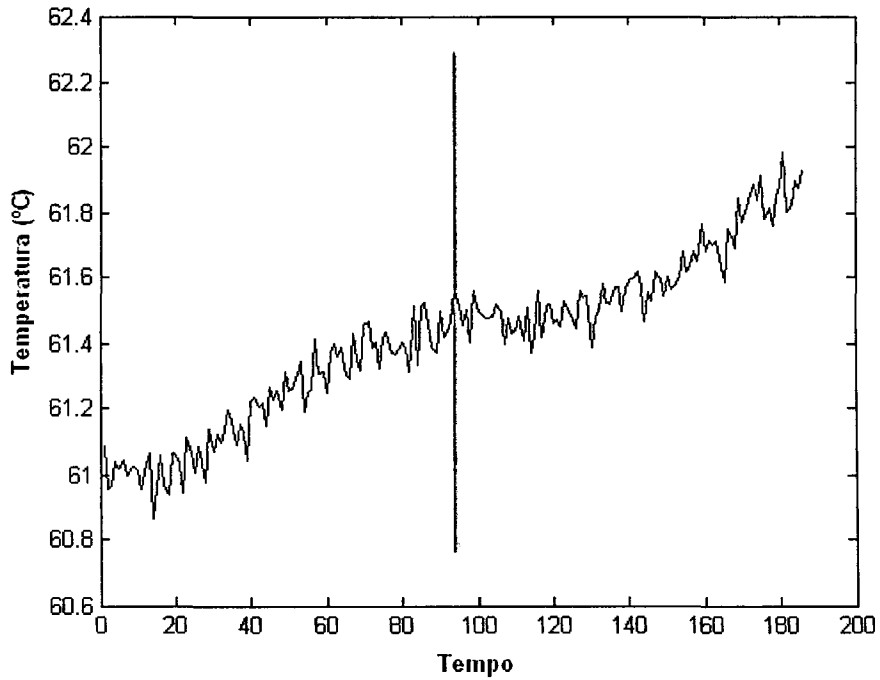


Figura 24 – Bloqueio de Vazão no Sistema Secundário a 2500W e vazão do secundário a 120l/h – Saída do Aquecedor

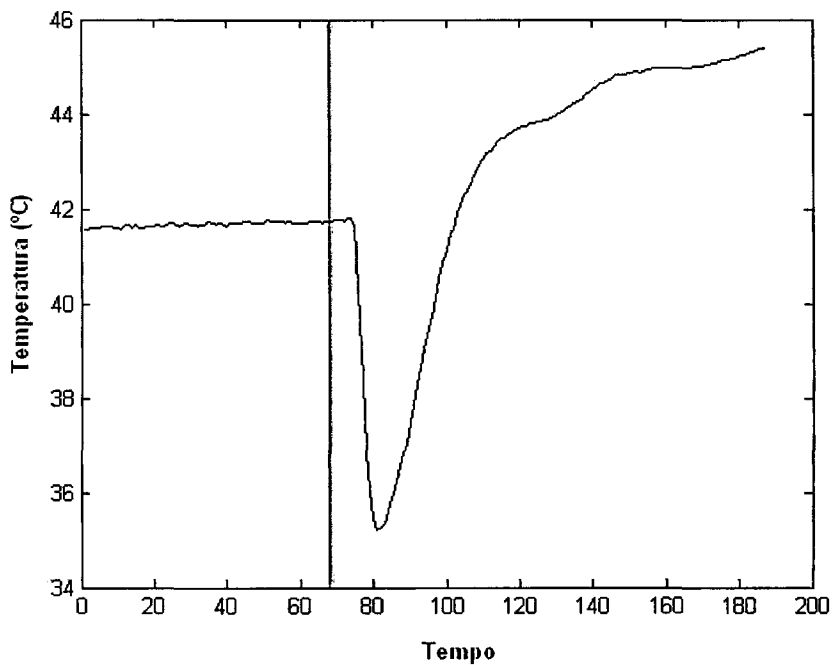


Figura 25 – Abertura de Linha de Desvio no Sistema Primário a 2000W e vazão do secundário a 60l/h – Entrada do Aquecedor

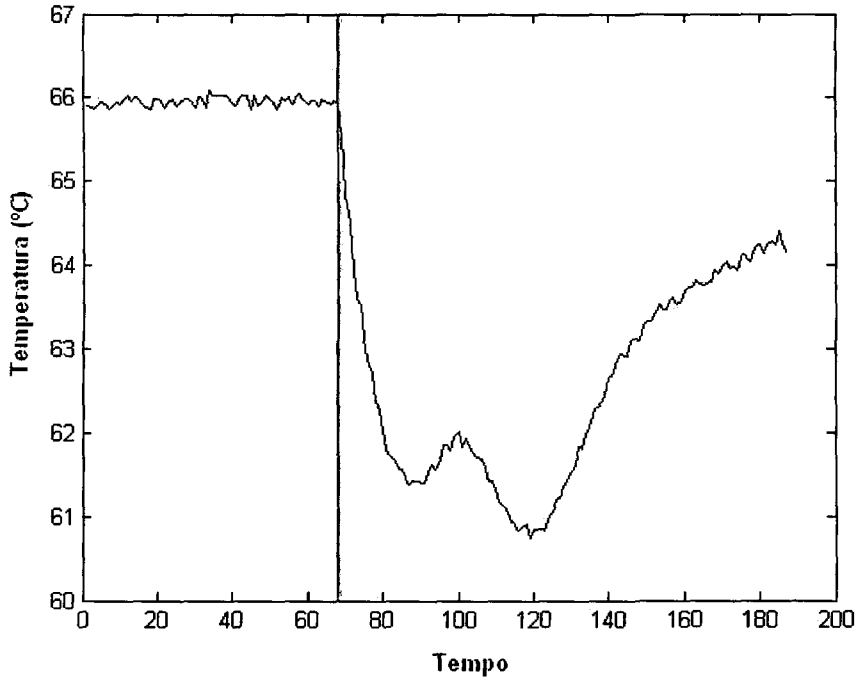


Figura 26 – Abertura de Linha de Desvio no Sistema Primário a 2000W e vazão do secundário a 60l/h – Saída do Aquecedor

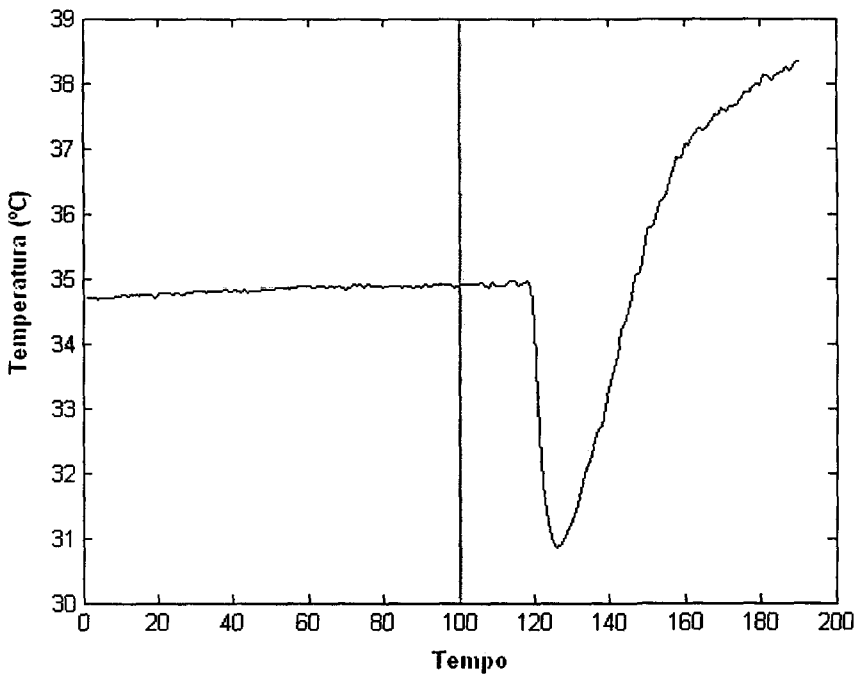


Figura 27 – Abertura de Linha de Desvio no Sistema Primário a 2000W e vazão do secundário a 120l/h – Entrada do Aquecedor

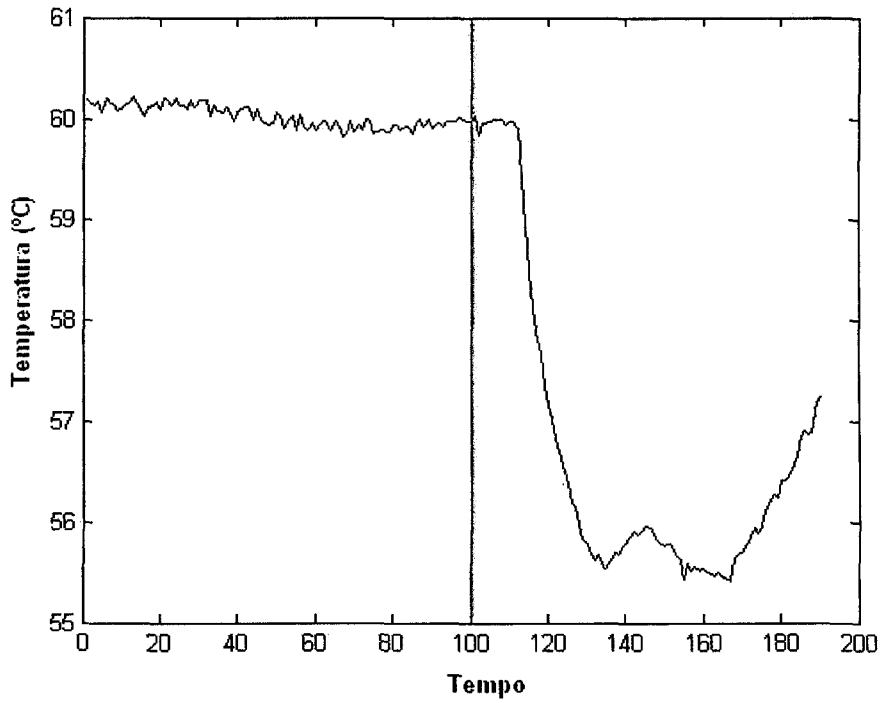


Figura 28 – Abertura de Linha de Desvio no Sistema Primário a 2000W e vazão do secundário a 120l/h – Saída do Aquecedor

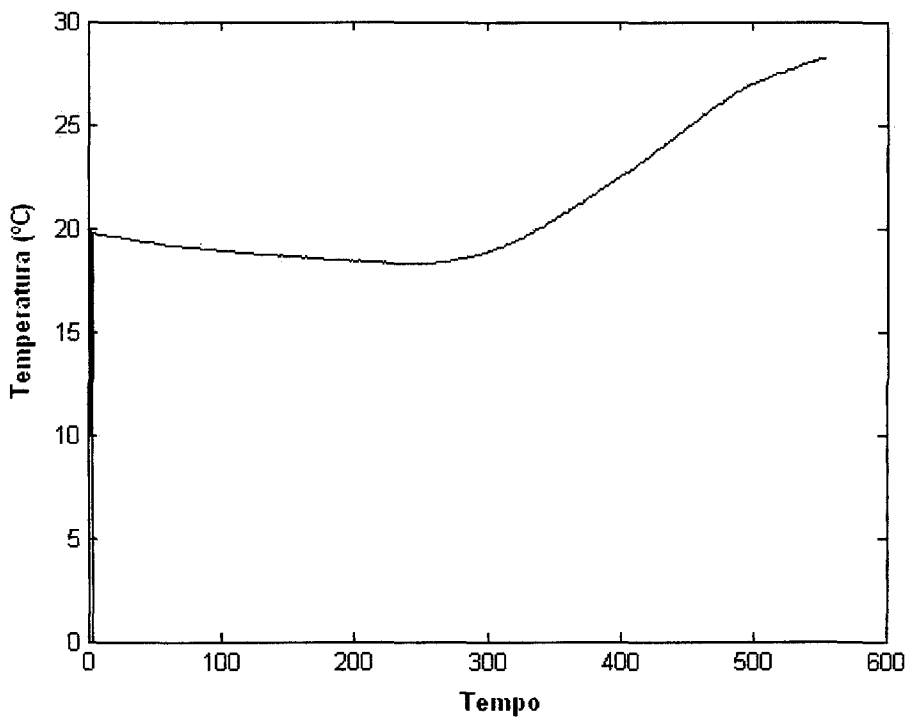


Figura 29 – Rampas de Potência Positivas – Entrada do Aquecedor

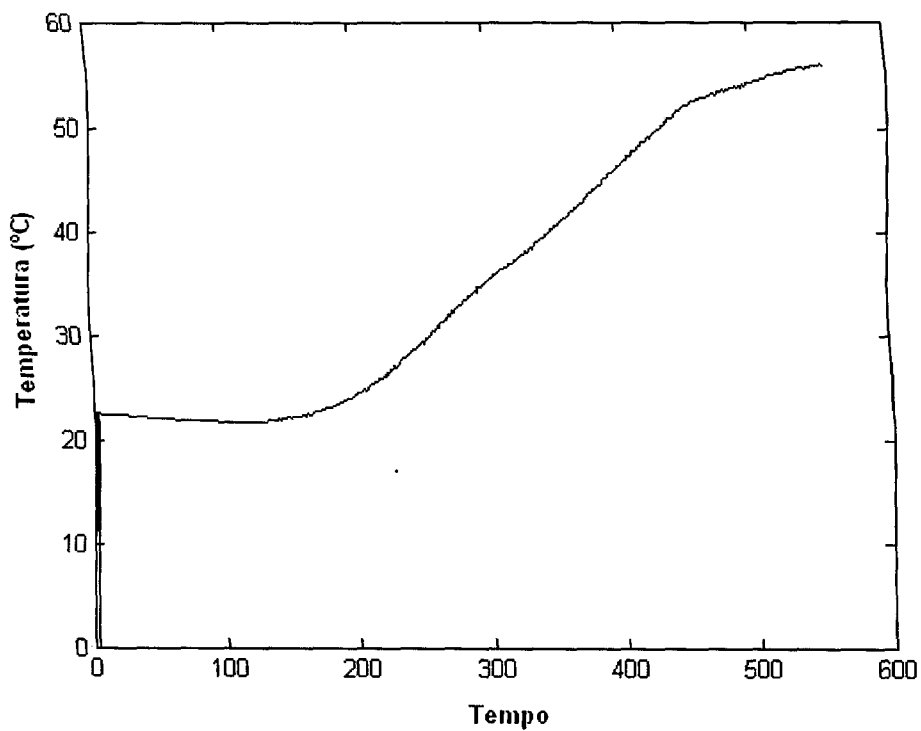


Figura 30 – Rampas de Potência Positivas – Saída do Aquecedor

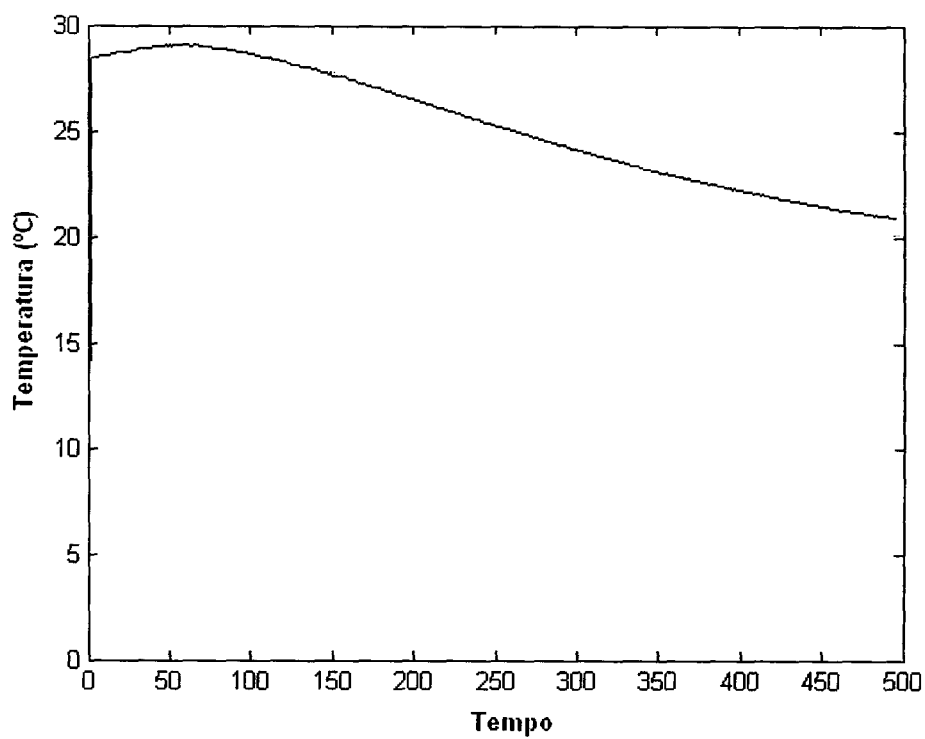


Figura 31 – Rampas de Potência Negativas – Entrada do Aquecedor

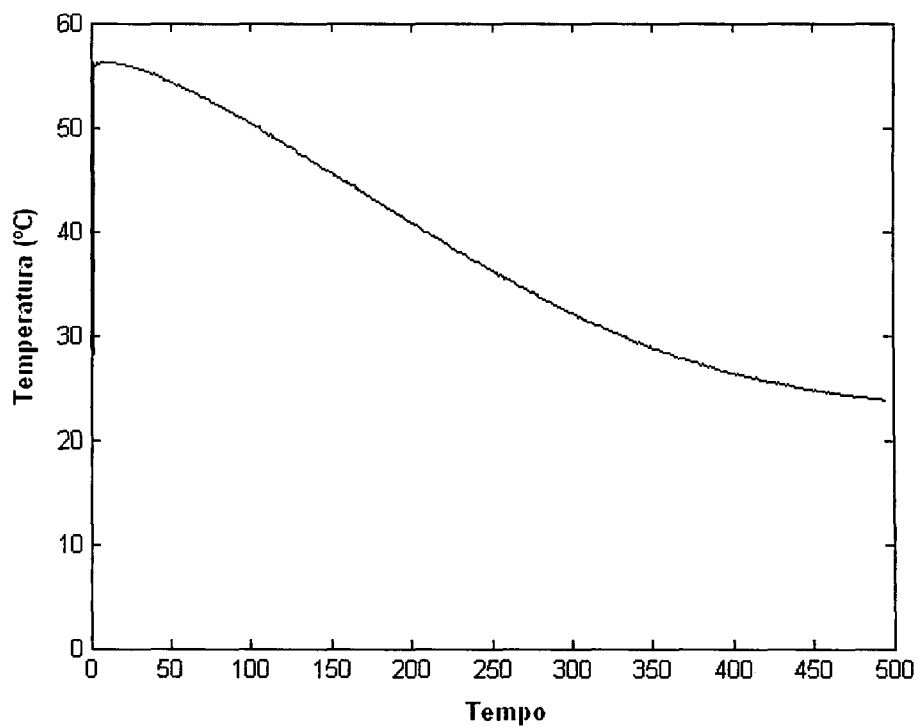


Figura 32 – Rampas de Potência Negativas – Saída do Aquecedor

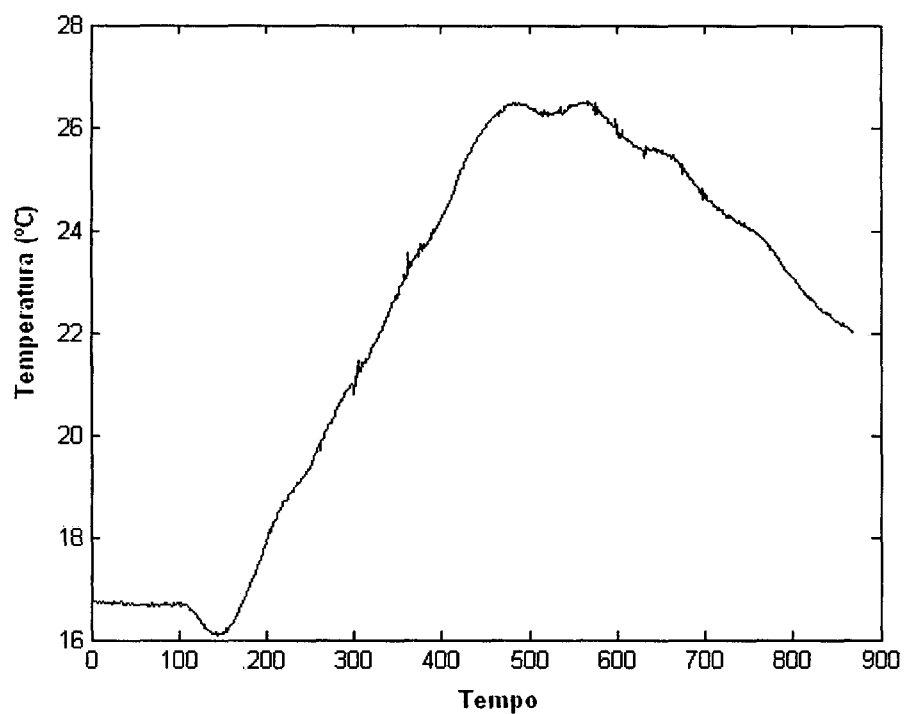


Figura 33 – Steps de Potência – Entrada do Aquecedor

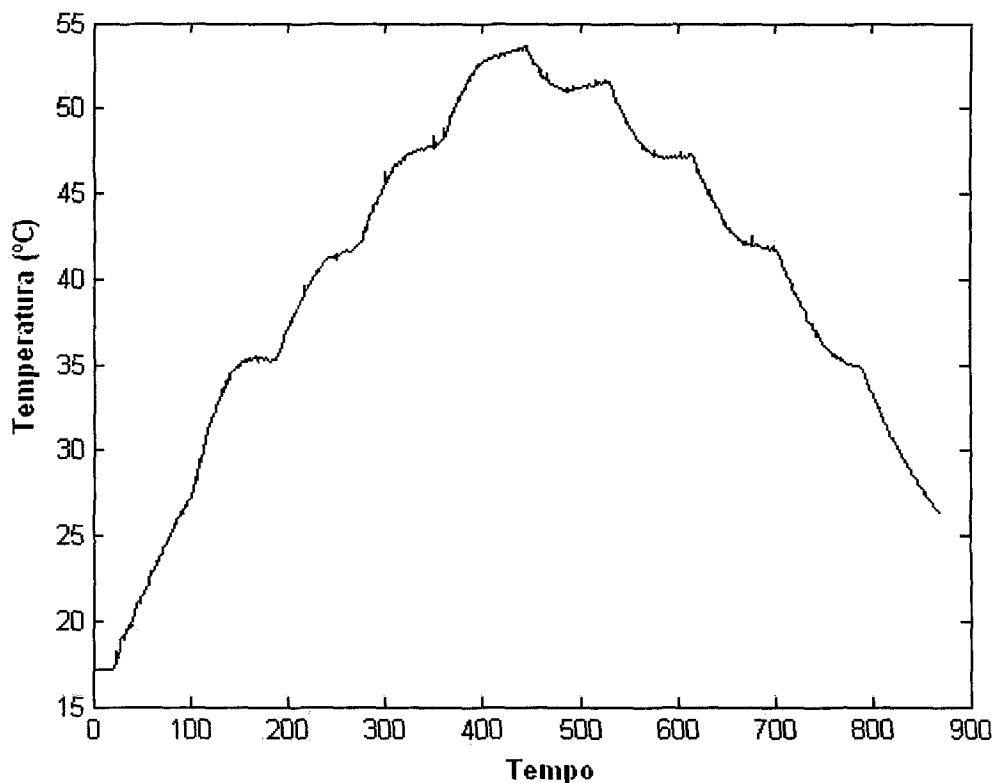


Figura 34 – Steps de Potência – Saída do Aquecedor

5.2. Redes Neurais

Ao todo, 56 experimentos computacionais, de seleção da configuração ótima de redes neurais, foram realizados. Nesta dissertação são apresentados dois experimentos que o autor considera mais ilustrativos do potencial da técnica aplicada.

No Apêndice estão listados todos os dados destes dois experimentos, sendo que, o seu resultado será exposto também a seguir.

Este experimento foi feito desprezando os conjuntos de rampas e de bloqueio de vazão no secundário, por motivos que serão apresentados na seção 6.1.

Estes resultados foram obtidos da combinação dos parâmetros da Tabela 3. Na coluna “Parâmetro”, o item “Combinações *cross-validation*” indica a quantidade de subdivisões dos conjuntos de dados feitas para a aplicação da técnica *cross-validation*. O item da linha “Vizinhança”, na coluna “Configurações”, usam a notação significando [inicial final] partes da quantidade de neurônios na coluna da grade.

Tabela 3 – Parâmetros de treinamento

Parâmetro	Configurações	Total
Tamanho do Buffer	18 períodos de 7 segundos	1
Grade	8x8 e 12x12 unidades	2
Épocas	2, 3 e 5	3
Tipos de malha	hexagonal e quadrada	2
Inicialização	dados iniciais do conjunto	1
Vizinhança	[0.33 0.0033], [0.66 0.0066], [0.99 0.0099] e [1.2 0.012]	4
Combinações <i>cross-validation</i>	5	5

Lembrando que estes parâmetros foram aplicados a cada uma das redes especialistas. E cada rede especialista pertence a um transitório. Multiplicando os itens da coluna “Total”, obtemos a quantidade de redes treinadas para cada transitório: 240.

O processo de avaliação de resultados, pela técnica de avaliação por produto cartesiano, é extremamente lento, devido à grande quantidade de combinações possíveis dos parâmetros de treinamento a serem avaliados, utilizando produto cartesiano. Neste exemplo, 240 redes são treinadas para cada transitório. Para aplicar totalmente a avaliação por produto cartesiano, seria necessário avaliar $45.864.714.240.000.000 = 240^7$ combinações destas redes.

Através do método de avaliação utilizando a função de medida de desempenho, explicada na seção 4.2.1, foram obtidos os resultados expostos da Tabela 5 à 0, onde na Tabela 5 estão os resultados referentes à classificação dos SOMs, e da Tabela 6 à 0 estão expostos os resultados referentes aos semáforos.

As siglas dos conjuntos expostos nestas tabelas de resultados estão explicadas na Tabela 4. Interprete o termo “% de Acertos”, na Tabela 5 e na Tabela 10, como a porcentagem de padrões classificados corretamente, isto é, porcentagem de vezes onde o menor erro de quantização foi o da rede correspondente ao estado transitório apresentado ao sistema. Já o termo “% de indicações”, usado da Tabela 6 à 0 e da Tabela 11 à Tabela 13 deve ser interpretado como a porcentagem de vezes, para os padrões correspondentes nas colunas, que o semáforo indicado foi aceso.

Na Tabela 9 e Tabela 14, estão os parâmetros de treinamento, selecionados pelos dois métodos de avaliação, que geraram os resultados expostos. Na linha “Buffer”, os números indicam a quantidade de amostras utilizadas do conjunto de treinamento para a formação do buffer. A linha “Grade” indica a configuração “linha x coluna” de unidades na camada de saída. Já a linha “Tipo de Malha” usa a notação “H” para hexagonal e “Q” para quadrada, assim como na linha “Inicialização”, “D” significa que a rede utilizou os dados iniciais do conjunto de treinamento. Por fim, a linha “Vizinhança” se aproveita da notação “[inicial final]” partes da quantidade de unidades na coluna da grade da camada de saída.

Tabela 4 – Descrição das siglas dos conjuntos

Conjunto	Descrição
A	Aquecimento
Re	Resfriamento
RP	Regime Permanente
Sp	Step Positivo
Sn	Step Negativo
LD	Abertura de Linha de Desvio no Sistema Primário
BP	Bloqueio de vazão no Sistema Primário

Tabela 5 - Resultados entre os conjuntos (Função MD)

Conjunto	A	Re	RP	Sp	Sn	LD	BP	Média
% de acertos	96,17	100	0	19	54,41	100	100	67,08

Tabela 6 – Verdes (Função MD)

Conjunto	A	Re	RP	Sp	Sn	LD	BP
% de indicações	82,93	66,67	61,86	50	73,53	67,65	58,82

Tabela 7 – Amarelos (Função MD)

Conjunto	A	Re	RP	Sp	Sn	LD	BP
% de indicações	11,96	06,25	16,95	25,00	23,53	26,47	23,53

Tabela 8 – Vermelhos (Função MD)

Conjunto	A	Re	RP	Sp	Sn	LD	BP
% de indicações	5,10	27,08	21,19	25	2,94	5,88	17,65

Tabela 9 – Parâmetros de treinamento dos SOMs eleitos pelo método de avaliação por função de medida de desempenho.

	A	Re	RP	Sp	Sn	LD	BP
Buffer	18	18	18	18	18	18	18
Grade	8 x 8	12 x 12	8 x 8	8 x 8	8 x 8	8 x 8	8 x 8
Épocas	5	3	2	3	2	2	2
Tipo de Malha	Q	Q	H	H	Q	H	Q
Inicialização	D	D	D	D	D	D	D
Vizinhança	[0.33 0.0033]	[0.33 0.0033]	[1.2 0.012]	[1.2 0.012]	[0.33 0.0033]	[0.33 0.0033]	[0.33 0.0033]

Após aproximadamente 60 horas de avaliações, o melhor resultado detectado, via produto cartesiano, foi o exposto da Tabela 10 à Tabela 13. Sendo a Tabela 10 referente à classificação dos SOMs e da Tabela 11 à Tabela 13 estão os resultados referentes aos semáforos. Os parâmetros responsáveis por estes resultados estão expostos na Tabela 14.

Resultado Geral: 88,52% de acertos.

Tabela 10 - Resultados entre os conjuntos (Produto Cartesiano)

Conjunto	A	Re	RP	Sp	Sn	LD	BP	Média
% de acertos	94,90	100	75	75	75	100	91,18	87,30

Semáforos:

Tabela 11 – Verdes (Produto Cartesiano)

Conjunto	A	Re	RP	Sp	Sn	LD	BP
% de indicações	56,62	39,58	60,17	48,53	64,71	52,94	64,71

Tabela 12 – Amarelos (Produto Cartesiano)

Conjunto	A	Re	RP	Sp	Sn	LD	BP
% de indicações	39,71	33,33	39,41	26,47	35,29	26,47	11,76

Tabela 13 – Vermelhos (Produto Cartesiano)

Conjunto	A	Re	RP	Sp	Sn	LD	BP
% de indicações	03,67	27,08	00,42	25,00	0	20,59	23,53

Tabela 14 – Parâmetros de treinamento dos SOMs eleitos pelo método de avaliação por produto cartesiano.

	A	Re	RP	Sp	Sn	LD	BP
Buffer	18	18	18	18	18	18	18
Grade	8 x 8	8 x 8	8 x 8	8 x 8	8 x 8	8 x 8	8 x 8
Épocas	5	3	2	2	2	2	2
Tipo de Malha	H	Q	H	H	H	H	H
Inicialização	D	D	D	D	D	D	D
Vizinhança	[0.33 0.0033]	[0.33 0.0033]	[0.33 0.0033]	[0.33 0.0033]	[0.33 0.0033]	[0.33 0.0033]	[0.33 0.0033]

Percebe-se que alguns parâmetros não são alterados, como o tamanho do buffer e a inicialização. Este experimento foi programado desta maneira dada a necessidade de diminuir ao máximo a quantidade de parâmetros testados nos experimentos, pelos motivos expostos no início desta seção.

Estes parâmetros foram escolhidos utilizando o conhecimento obtido pelo autor com outros experimentos, algo em torno de 50 dos 56 experimentos, onde 80% das redes eleitas haviam sido treinadas com o buffer de 18 amostras, e 90% das redes eleitas utilizaram a inicialização por dados iniciais do conjunto de treinamento.

Para exemplificar os resultados obtidos, segue a Tabela 15 e a Figura 35 para auxiliar na comparação de ambos os métodos. "Função MD" significa Função de Medida de Desempenho, % de acertos indica a porcentagem global de padrões classificados corretamente (média de todas as redes), e % de indicações (cor) indica a porcentagem global de indicações da cor citada (média de todas as redes).

Tabela 15 - Resultados Globais

Método	% de Acertos	% de Indicações Verde	% de Indicações Amarelo	% de Indicações Vermelho
Função MD	67,08	65,92	19,10	14,98
Produto Cartesiano	87,30	55,32	30,35	14,33

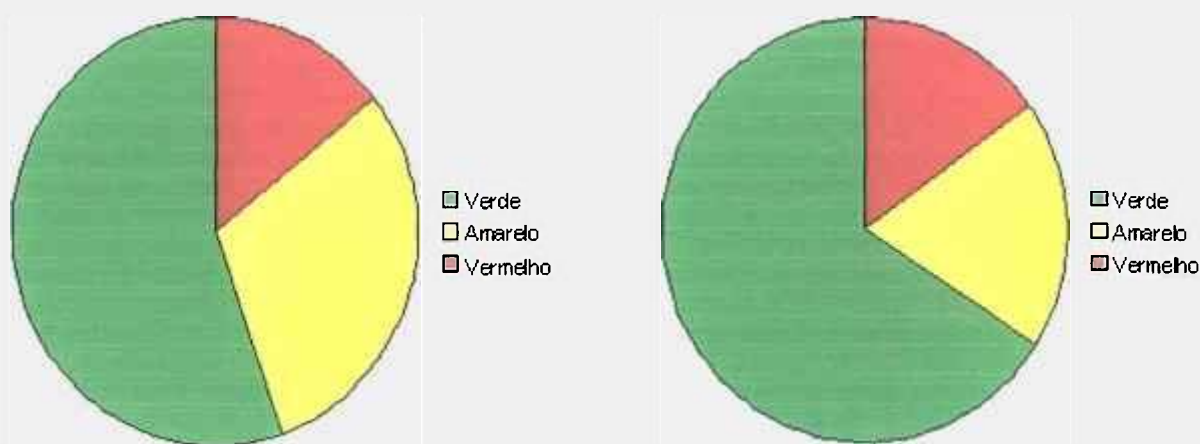


Figura 35 – Proporção de indicações dos semáforos. À esquerda sob o método de avaliação por produto cartesiano, à direita sob o método de avaliação por função de medida de desempenho.

5.3. Interface com o Usuário

O Labview possui recursos suficientes para a construção de uma interface com o usuário da maneira proposta neste trabalho.

Da Figura 36 à Figura 38, é apresentada a interface com o usuário implementada. À direita, três círculos representam o semáforo, sendo cada um de uma cor, vermelho, amarelo e verde. No centro da imagem está a caixa de texto onde são apresentados os estados transitórios em curso. Estas 3 imagens ilustram o que o sistema apresenta sob 3 estados diferentes, escolhidos como exemplo: regime permanente, aquecimento e resfriamento. E ainda, cada um deles apresentando um resultado de confiabilidade diferente, representados pelos círculos acesos do semáforo.



Identificação e Classificação de Transientes

Estado

Regime Permanente

Versão 1.0 - 2008
Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares

Incerteza



Atenção



Normal



Figura 36 – Sistema apresentando o estado de Regime Permanente, sob medida de confiança certa.



Identificação e Classificação de Transientes

Estado

Aquecimento

Versão 1.0 - 2008
Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares

Incerteza



Atenção



Normal



Figura 37 – Sistema apresentando o estado de Aquecimento, sob medida de confiança que requer atenção.



Identificação e Classificação de Transientes

Estado

Resfriamento

Incerteza



Atenção



Normal



Versão 1.0 - 2008
Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares

Figura 38 – Sistema apresentando o estado de Resfriamento, sob medida de confiança incerta.

6. ANÁLISE DE RESULTADOS

6.1. Aquisição de Dados

Na maioria das figuras, fica clara a diferença entre o estado anterior e o posterior ao evento do transitório. Porém, em alguns casos, como o de bloqueio de vazão do sistema secundário e nas rampas, esta mudança não se torna evidente. Contudo, isto é causado pela característica da bancada de circulação natural em responder lentamente a estes transitórios.

Por isso que, em alguns experimentos computacionais via redes neurais, estes transitórios foram retirados da análise. O bloqueio de vazão do sistema secundário demora de tal forma que chega a não ser detectado no maior dos buffers testado, e as rampas de potência podem ser aglomeradas ao conjunto de aquecimento e resfriamento, pois a rigor eles são a mesma coisa. Obviamente que um detalhamento maior, como o que especifica o quanto de potência está variando, fica muito mais difícil de ser feito, porém, em um reator real, estes transitórios de rampas de potência ficariam muito mais claros ao sistema, possibilitando assim a sua inclusão no sistema como transitórios separados.

6.2. Redes Neurais

Observando os resultados obtidos via o método de avaliação por função de medida de desempenho, na Tabela 5, é possível perceber que algumas redes obtiveram resultados muito baixos, lembrando que cada transitório possui uma rede, chegando a zero em um dos casos, e, mesmo com o alto desempenho de algumas outras redes, isto ocasionou uma taxa de acertos médio de 67,08, o que é baixo.

Também ficou perceptível que os semáforos não obtiveram, em alguns casos, resultados coerentes com as médias de acertos. Por exemplo, no caso do transitório de regime permanente, o sistema errou todas as vezes, porém, os semáforos das respostas para estes transitórios indicaram o verde, isto é, confiável, a maior parte das vezes.

A avaliação por meio do produto cartesiano, como explicado na seção 4.2.2.2, das redes geradas sob os diversos parâmetros de treinamento é lenta em

comparação com a avaliação por produto função de medida de desempenho, dado que, para chegar aos resultados apresentados na seção 5.2, a avaliação por produto cartesiano demorou mais de 60 horas, sendo que a avaliação por função de medida de desempenho não mais que alguns minutos. Porém, com a disponibilidade de um bom hardware, é a melhor a ser feita, pois trará o melhor dos resultados possíveis dentro dos parâmetros escolhidos.

Comparando as porcentagens de acertos entre as redes com o resultado geral fica claro o quanto o conjunto de aquecimento, dado o seu enorme tamanho, condiciona os resultados gerais. Porém, a média dos acertos entre as redes caiu somente cerca de 3 pontos percentuais.

O comportamento dos semáforos ocorreu, em sua maior parte, como o esperado. Como a quantidade de acertos é grande, a maior parte das vezes os sinais verdes são dados. Em menor quantidade, os sinais amarelos, e por fim os vermelhos. Obviamente que existem casos de alguns padrões que devem ser avaliados com mais cuidado, mas isto é mais pertinente no caso de dados provenientes de um reator real. Como neste trabalho foram utilizados dados de uma bancada de circulação natural, onde não é possível experimentos mais complexos, esta análise não é necessária.

É interessante observar que a maioria dos parâmetros das redes é igual. Isto ocorreu pois a avaliação total chega a durar mais de uma semana, e devido à problemas técnicos, esta teve que ser interrompida antes de ser finalizada.

Dos dois métodos, o de avaliação por produto cartesiano mostrou-se mais eficiente. Apesar de lento, este método retorna resultados melhores que o de função de medida de desempenho logo nos primeiros resultados.

O método de avaliação via função de medida de desempenho não deve ser descartado de futuras pesquisas, pois por se tratar de uma função, esta pode ser ajustada até que se torne possível obter resultados razoáveis, e então utilizar este método no lugar da avaliação por produto cartesiano, por ser muito mais rápido.

6.3. Interface com o Usuário

Foi possível construir uma interface conforme o proposto, extremamente simples e de fácil compreensão.

A mensagem “Estado”, em fontes grandes e destacada ao centro, permite que o operador a observe antes do restante das informações.

O semáforo foi colocado estrategicamente à direita, pois é a região onde normalmente ficam legendas, e ainda, está imediatamente à direita da mensagem “Estado”. Ou seja, a tendência dos olhos durante a leitura é prosseguir da esquerda para a direita, sendo assim, primeiro o usuário olhará para a mensagem, e logo após para o semáforo. Assim, as duas principais informações ficam imediatamente disponíveis ao operador.

O uso de cores é extremamente intuitivo, e ainda, as cores utilizadas fazem analogia proposital ao semáforo de trânsito, ao qual todos já estão acostumados a compreender de imediato.

É importante ressaltar que a exibição de resultados numéricos não é recomendada, dado que o objetivo do sistema é justamente facilitar ao operador a interpretação dos estados do reator. Apresentar conceitos prontos, e já conhecidos, como é o caso dos rótulos dados aos estados é muito mais eficaz no que diz respeito à rapidez de interpretação.

CONCLUSÕES

Utilizando os dados da bancada de circulação natural foi possível construir um sistema de identificação e classificação de transitórios, utilizando técnicas de inteligência artificial, mais especificamente mapas auto-organizáveis, que obtivesse resultados satisfatórios como uma primeira versão.

Neste trabalho, a plasticidade dos SOMs, após o treinamento inicial, inexistente. O autor utilizou esta configuração por razões de segurança, pois a plasticidade do SOM é, naturalmente, não-supervisionada. Deixar o sistema evoluir com o tempo sem avaliar o seu desempenho seria muito arriscado, e a segurança de operação de uma usina nuclear é uma das principais preocupações deste projeto.

No futuro, deve-se desenvolver um algoritmo de plasticidade supervisionada, isto é, onde as redes se adaptem, porém supervisionadas por um operador especializado nos estados transitórios. Assim, este operador deve ter o poder de pedir para que o sistema aprenda a identificar e classificar um padrão novo da maneira correta, e também de verificar se o sistema aprendeu satisfatoriamente. E, caso não tenha aprendido, possa voltar atrás e manter a configuração original, ou até mesmo treinando novamente as redes, porém utilizando parâmetros diferentes. Mas, dar a responsabilidade ao operador de modificar parâmetros de treinamento é uma situação delicada, pois exigiria um conhecimento que não necessariamente o mesmo teria. Logo, o conceito de um algoritmo de plasticidade supervisionada torna-se algo digno de um estudo aprofundado e delicado.

Para o treinamento e escolha da configuração ótima dos SOMs, foi utilizada uma técnica diferente da convencional, que é utilizar múltiplas redes especialistas para fazer a classificação e identificação dos transitórios, sendo que esta técnica provou-se muito eficiente, e também é muito promissora no que diz respeito ao desenvolvimento de novas funcionalidades em futuros projetos.

Uma destas funcionalidades pode ser que a rede, além de responder qual transitório está em curso, também dê informações adicionais sobre o mesmo.

Por exemplo: no caso de *Steps*, o sistema pode fornecer como informação adicional a variação de potência. Ou ainda, informações adicionais sobre o acidente em curso, como a intensidade da vazão corrente na linha de desvio recém aberta.

A técnica de avaliação de desempenho, por função de medida de desempenho, deve ser aprimorada para que possa substituir a técnica de avaliação por produto cartesiano. Isto permitirá que uma quantidade maior de configurações das redes possa ser testada, já que a avaliação por função de medida de desempenho é muito mais rápida do que por produto cartesiano, como demonstrado na seção 5.2, e comentado na seção 6.2.

Todos os dados utilizados pelo sistema foram obtidos, pelo autor desta dissertação, via experimentação em uma bancada de circulação natural, cumprindo, assim, outro objetivo do trabalho.

O objetivo de apresentar resultados de forma simples, objetiva, de fácil interpretação pelos operadores das usinas nucleares, e ainda apresentando uma medida de confiabilidade, foi completamente atingido. Isto atende aos requisitos de segurança, já que, pela fácil absorção das informações apresentadas, o operador pode tomar atitudes mais prontamente, e todas as informações apresentadas possuem a sua classificação de confiabilidade, permitindo ao operador saber quando conferir o estado do reator mais detalhadamente, para verificar se o estado transitório em curso condiz com o apresentado pelo sistema.

APÊNDICE A – Dados gerados pela avaliação via produto cartesiano

Seguem os dados das primeiras 60 horas do experimento considerado de maior relevância neste trabalho.

Legendas:

{Data e hora da ocorrência}

Resultado Geral

{Fração do total de acertos com 12 casas decimais.}

Resultados Conjuntos

{Frações dos totais de acertos de cada conjunto, com 12 casas decimais, separadas por ‘;’ }

Semáforos

Verde

{Frações dos totais de ativações de cada conjunto, com 12 casas decimais, separadas por ‘;’}

Amarelo

{Frações dos totais de ativações de cada conjunto, com 12 casas decimais, separadas por ‘;’}

Vermelho

{Frações dos totais de ativações de cada conjunto, com 12 casas decimais, separadas por ‘;’}

Parâmetros

{Conjunto Sigla do conjunto}

Buffer: {quantidade de períodos de 7 segundos; }

Grade: {quantidade de linhas por quantidade de colunas, separadas por espaço em branco};

Épocas: {quantidade;}

Tipo de Malha: {hexa para hexadecimal e quadrada para quadrada;}

Inicialização: {cjto para valores iniciais do conjunto de treinamento;}

Vizinhança: {Frações do total das colunas, iniciais e finais, separadas por ‘;’}

23/2/2008 16:10:36

Resultado Geral

0.715695067264574

Resultados Conjuntos

[0.703349282296651;0.5;0.720338983050847;0.75;0.75;1;0.794117647058823]

Semáforos

Verde

[0.601275917065391;0.625;0.864406779661017;0.485294117647059;0.867647058823529;0.529411764705882;0.852941176470588]

Amarelo

[0.231259968102073;0.0833333333333333;0.13135593220339;0.264705882352941;0.132352941176471;0.264705882352941;0.0294117647058824]

Vermelho

[0.167464114832536;0.291666666666667;0.00423728813559322;0.25;0;0.205882352941176;0.117647058823529]

Parâmetros

Conjunto A

Buffer: 18; Grade: [8 8]; Épocas: 2; Tipo de Malha: hexa; Inicialização: cjto; Vizinhança: [0.33 0.0033]

Conjunto Re

Buffer: 18; Grade: [8 8]; Épocas: 2; Tipo de Malha: hexa; Inicialização: cjto; Vizinhança: [0.33 0.0033]

Conjunto RP

Buffer: 18; Grade: [8 8]; Épocas: 2; Tipo de Malha: hexa; Inicialização: cjto; Vizinhança: [0.33 0.0033]

Conjunto Sp

Buffer: 18; Grade: [8 8]; Épocas: 2; Tipo de Malha: hexa; Inicialização: cjto; Vizinhança: [0.33 0.0033]

Conjunto Sn

Buffer: 18; Grade: [8 8]; Épocas: 2; Tipo de Malha: hexa; Inicialização: cjto; Vizinhança: [0.33 0.0033]

Conjunto LD

Buffer: 18; Grade: [8 8]; Épocas: 2; Tipo de Malha: hexa; Inicialização: cjto;
 Vizinhaça: [0.33 0.0033]

Conjunto BP

Buffer: 18; Grade: [8 8]; Épocas: 2; Tipo de Malha: hexa; Inicialização: cjto;
 Vizinhaça: [0.33 0.0033]

23/2/2008 16:11:28

Resultado Geral

0.723766816143498

Resultados Conjuntos

[0.703349282296651;0.5;0.720338983050847;0.779411764705882;0.75;1;1]

Semáforos**Verde**

[0.598086124401914;0.625;0.864406779661017;0.485294117647059;0.8676470
 58823529;0.529411764705882;0.647058823529412]

Amarelo

[0.232854864433812;0.0833333333333333;0.13135593220339;0.264705882352
 941;0.132352941176471;0.264705882352941;0.0294117647058824]

Vermelho

[0.169059011164274;0.291666666666667;0.00423728813559322;0.25;0;0.20588
 2352941176;0.323529411764706]

Parâmetros**Conjunto A**

Buffer: 18; Grade: [8 8]; Épocas: 2; Tipo de Malha: quadrada; Inicialização: cjto;
 Vizinhaça: [0.33 0.0033]

Conjunto Re

Buffer: 18; Grade: [8 8]; Épocas: 2; Tipo de Malha: hexa; Inicialização: cjto;
 Vizinhaça: [0.33 0.0033]

Conjunto RP

Buffer: 18; Grade: [8 8]; Épocas: 2; Tipo de Malha: hexa; Inicialização: cjto;
 Vizinhaça: [0.33 0.0033]

Conjunto Sp

Buffer: 18; Grade: [8 8]; Épocas: 2; Tipo de Malha: hexa; Inicialização: cjt;
Vizinhança: [0.33 0.0033]

Conjunto Sn

Buffer: 18; Grade: [8 8]; Épocas: 2; Tipo de Malha: hexa; Inicialização: cjt;
Vizinhança: [0.33 0.0033]

Conjunto LD

Buffer: 18; Grade: [8 8]; Épocas: 2; Tipo de Malha: hexa; Inicialização: cjt;
Vizinhança: [0.33 0.0033]

Conjunto BP

Buffer: 18; Grade: [8 8]; Épocas: 2; Tipo de Malha: hexa; Inicialização: cjt;
Vizinhança: [0.33 0.0033]

23/2/2008 16:12:21

Resultado Geral

0.829596412556054

Resultados Conjuntos

[0.883572567783094;0.5;0.75;0.75;0.75;1;1]

Semáforos

Verde

[0.61244019138756;0.625;0.601694915254237;0.485294117647059;0.86764705
8823529;0.529411764705882;0.647058823529412]

Amarelo

[0.32695374800638;0.0833333333333333;0.39406779661017;0.2647058823529
41;0.132352941176471;0.264705882352941;0.0294117647058824]

Vermelho

[0.0606060606060606;0.291666666666667;0.00423728813559322;0.25;0;0.2058
82352941176;0.323529411764706]

Parâmetros

Conjunto A

Buffer: 18; Grade: [8 8]; Épocas: 3; Tipo de Malha: hexa; Inicialização: cjt;
Vizinhança: [0.33 0.0033]

Conjunto Re

Buffer: 18; Grade: [8 8]; Épocas: 2; Tipo de Malha: hexa; Inicialização: cjto;
Vizinhança: [0.33 0.0033]

Conjunto RP

Buffer: 18; Grade: [8 8]; Épocas: 2; Tipo de Malha: hexa; Inicialização: cjto;
Vizinhança: [0.33 0.0033]

Conjunto Sp

Buffer: 18; Grade: [8 8]; Épocas: 2; Tipo de Malha: hexa; Inicialização: cjto;
Vizinhança: [0.33 0.0033]

Conjunto Sn

Buffer: 18; Grade: [8 8]; Épocas: 2; Tipo de Malha: hexa; Inicialização: cjto;
Vizinhança: [0.33 0.0033]

Conjunto LD

Buffer: 18; Grade: [8 8]; Épocas: 2; Tipo de Malha: hexa; Inicialização: cjto;
Vizinhança: [0.33 0.0033]

Conjunto BP

Buffer: 18; Grade: [8 8]; Épocas: 2; Tipo de Malha: hexa; Inicialização: cjto;
Vizinhança: [0.33 0.0033]

23/2/2008 16:13:13

Resultado Geral

0.834080717488789

Resultados Conjuntos

[0.912280701754386;0.5;0.711864406779661;0.75;0.75;1;0.882352941176471]

Semáforos

Verde

[0.645933014354067;0.625;0.639830508474576;0.485294117647059;0.867647058823529;0.529411764705882;0.764705882352941]

Amarelo

[0.272727272727273;0.0833333333333333;0.355932203389831;0.264705882352941;0.132352941176471;0.264705882352941;0.0294117647058824]

Vermelho

[0.0813397129186603;0.291666666666667;0.00423728813559322;0.25;0;0.205882352941176;0.205882352941176]

Parâmetros

Conjunto A

Buffer: 18; Grade: [8 8]; Épocas: 3; Tipo de Malha: quadrada; Inicialização: cjto;
Vizinhança: [0.33 0.0033]

Conjunto Re

Buffer: 18; Grade: [8 8]; Épocas: 2; Tipo de Malha: hexa; Inicialização: cjto;
Vizinhança: [0.33 0.0033]

Conjunto RP

Buffer: 18; Grade: [8 8]; Épocas: 2; Tipo de Malha: hexa; Inicialização: cjto;
Vizinhança: [0.33 0.0033]

Conjunto Sp

Buffer: 18; Grade: [8 8]; Épocas: 2; Tipo de Malha: hexa; Inicialização: cjto;
Vizinhança: [0.33 0.0033]

Conjunto Sn

Buffer: 18; Grade: [8 8]; Épocas: 2; Tipo de Malha: hexa; Inicialização: cjto;
Vizinhança: [0.33 0.0033]

Conjunto LD

Buffer: 18; Grade: [8 8]; Épocas: 2; Tipo de Malha: hexa; Inicialização: cjto;
Vizinhança: [0.33 0.0033]

Conjunto BP

Buffer: 18; Grade: [8 8]; Épocas: 2; Tipo de Malha: hexa; Inicialização: cjto;
Vizinhança: [0.33 0.0033]

23/2/2008 16:14:05

Resultado Geral

0.863677130044843

Resultados Conjuntos

[0.94896331738437;0.5;0.75;0.75;0.75;1;0.911764705882353]

Semáforos

Verde

[0.566188197767145;0.604166666666667;0.601694915254237;0.485294117647
059;0.661764705882353;0.529411764705882;0.647058823529412]

Amarelo

[0.397129186602871;0.104166666666667;0.39406779661017;0.264705882352941;0.338235294117647;0.264705882352941;0.117647058823529]

Vermelho

[0.0366826156299841;0.291666666666667;0.00423728813559322;0.25;0;0.205882352941176;0.235294117647059]

Parâmetros

Conjunto A

Buffer: 18; Grade: [8 8]; Épocas: 5; Tipo de Malha: hexa; Inicialização: cjto; Vizinhaça: [0.33 0.0033]

Conjunto Re

Buffer: 18; Grade: [8 8]; Épocas: 2; Tipo de Malha: hexa; Inicialização: cjto; Vizinhaça: [0.33 0.0033]

Conjunto RP

Buffer: 18; Grade: [8 8]; Épocas: 2; Tipo de Malha: hexa; Inicialização: cjto; Vizinhaça: [0.33 0.0033]

Conjunto Sp

Buffer: 18; Grade: [8 8]; Épocas: 2; Tipo de Malha: hexa; Inicialização: cjto; Vizinhaça: [0.33 0.0033]

Conjunto Sn

Buffer: 18; Grade: [8 8]; Épocas: 2; Tipo de Malha: hexa; Inicialização: cjto; Vizinhaça: [0.33 0.0033]

Conjunto LD

Buffer: 18; Grade: [8 8]; Épocas: 2; Tipo de Malha: hexa; Inicialização: cjto; Vizinhaça: [0.33 0.0033]

Conjunto BP

Buffer: 18; Grade: [8 8]; Épocas: 2; Tipo de Malha: hexa; Inicialização: cjto; Vizinhaça: [0.33 0.0033]

23/2/2008 23:32:02

Resultado Geral

0.875336322869955

Resultados Conjuntos

[0.94896331738437;0.7708333333333333;0.75;0.75;0.75;1;0.911764705882353]

Semáforos

Verde

[0.566188197767145;0.6458333333333333;0.601694915254237;0.485294117647059;0.661764705882353;0.529411764705882;0.647058823529412]

Amarelo

[0.397129186602871;0.1875;0.39406779661017;0.264705882352941;0.338235294117647;0.264705882352941;0.117647058823529]

Vermelho

[0.0366826156299841;0.1666666666666667;0.00423728813559322;0.25;0;0.205882352941176;0.235294117647059]

Parâmetros

Conjunto A

Buffer: 18; Grade: [8 8]; Épocas: 5; Tipo de Malha: hexa; Inicialização: cjto; Vizinhança: [0.33 0.0033]

Conjunto Re

Buffer: 18; Grade: [8 8]; Épocas: 3; Tipo de Malha: hexa; Inicialização: cjto; Vizinhança: [0.33 0.0033]

Conjunto RP

Buffer: 18; Grade: [8 8]; Épocas: 2; Tipo de Malha: hexa; Inicialização: cjto; Vizinhança: [0.33 0.0033]

Conjunto Sp

Buffer: 18; Grade: [8 8]; Épocas: 2; Tipo de Malha: hexa; Inicialização: cjto; Vizinhança: [0.33 0.0033]

Conjunto Sn

Buffer: 18; Grade: [8 8]; Épocas: 2; Tipo de Malha: hexa; Inicialização: cjto; Vizinhança: [0.33 0.0033]

Conjunto LD

Buffer: 18; Grade: [8 8]; Épocas: 2; Tipo de Malha: hexa; Inicialização: cjto; Vizinhança: [0.33 0.0033]

Conjunto BP

Buffer: 18; Grade: [8 8]; Épocas: 2; Tipo de Malha: hexa; Inicialização: cjto; Vizinhança: [0.33 0.0033]

24/2/2008 00:27:34

Resultado Geral

0.876233183856502

Resultados Conjuntos

[0.945773524720893;0.8333333333333333;0.75;0.75;0.75;1;0.911764705882353]

Semáforos

Verde

[0.57097288676236;0.6666666666666667;0.601694915254237;0.485294117647059;0.661764705882353;0.529411764705882;0.647058823529412]

Amarelo

[0.397129186602871;0.1666666666666667;0.39406779661017;0.264705882352941;0.338235294117647;0.264705882352941;0.117647058823529]

Vermelho

[0.0318979266347687;0.1666666666666667;0.00423728813559322;0.25;0;0.205882352941176;0.235294117647059]

Parâmetros

Conjunto A

Buffer: 18; Grade: [8 8]; Épocas: 5; Tipo de Malha: hexa; Inicialização: cjt;
Vizinhança: [0.33 0.0033]

Conjunto Re

Buffer: 18; Grade: [8 8]; Épocas: 3; Tipo de Malha: hexa; Inicialização: cjt;
Vizinhança: [0.66 0.0066]

Conjunto RP

Buffer: 18; Grade: [8 8]; Épocas: 2; Tipo de Malha: hexa; Inicialização: cjt;
Vizinhança: [0.33 0.0033]

Conjunto Sp

Buffer: 18; Grade: [8 8]; Épocas: 2; Tipo de Malha: hexa; Inicialização: cjt;
Vizinhança: [0.33 0.0033]

Conjunto Sn

Buffer: 18; Grade: [8 8]; Épocas: 2; Tipo de Malha: hexa; Inicialização: cjt;
Vizinhança: [0.33 0.0033]

Conjunto LD

Buffer: 18; Grade: [8 8]; Épocas: 2; Tipo de Malha: hexa; Inicialização: cjto;
Vizinhança: [0.33 0.0033]

Conjunto BP

Buffer: 18; Grade: [8 8]; Épocas: 2; Tipo de Malha: hexa; Inicialização: cjto;
Vizinhança: [0.33 0.0033]

24/2/2008 03:13:59

Resultado Geral

0.878026905829596

Resultados Conjuntos

[0.94896331738437;0.8333333333333333;0.75;0.75;0.75;1;0.911764705882353]

Semáforos

Verde

[0.566188197767145;0.6875;0.601694915254237;0.485294117647059;0.661764
705882353;0.529411764705882;0.647058823529412]

Amarelo

[0.400318979266348;0.1458333333333333;0.39406779661017;0.2647058823529
41;0.338235294117647;0.264705882352941;0.117647058823529]

Vermelho

[0.0334928229665072;0.1666666666666667;0.00423728813559322;0.25;0;0.2058
82352941176;0.235294117647059]

Parâmetros

Conjunto A

Buffer: 18; Grade: [8 8]; Épocas: 5; Tipo de Malha: hexa; Inicialização: cjto;
Vizinhança: [0.33 0.0033]

Conjunto Re

Buffer: 18; Grade: [8 8]; Épocas: 3; Tipo de Malha: quadrada; Inicialização: cjto;
Vizinhança: [0.33 0.0033]

Conjunto RP

Buffer: 18; Grade: [8 8]; Épocas: 2; Tipo de Malha: hexa; Inicialização: cjto;
Vizinhança: [0.33 0.0033]

Conjunto Sp

Buffer: 18; Grade: [8 8]; Épocas: 2; Tipo de Malha: hexa; Inicialização: cjt0;
Vizinhança: [0.33 0.0033]

Conjunto Sn

Buffer: 18; Grade: [8 8]; Épocas: 2; Tipo de Malha: hexa; Inicialização: cjt0;
Vizinhança: [0.33 0.0033]

Conjunto LD

Buffer: 18; Grade: [8 8]; Épocas: 2; Tipo de Malha: hexa; Inicialização: cjt0;
Vizinhança: [0.33 0.0033]

Conjunto BP

Buffer: 18; Grade: [8 8]; Épocas: 2; Tipo de Malha: hexa; Inicialização: cjt0;
Vizinhança: [0.33 0.0033]

25/2/2008 23:12:22

Resultado Geral

0.880717488789238

Resultados Conjuntos

[0.94896331738437;1;0.75;0.75;0.676470588235294;1;0.911764705882353]

Semáforos

Verde

[0.566188197767145;0.416666666666667;0.601694915254237;0.485294117647
059;0.632352941176471;0.529411764705882;0.647058823529412]

Amarelo

[0.397129186602871;0.291666666666667;0.39406779661017;0.2647058823529
41;0.367647058823529;0.264705882352941;0.117647058823529]

Vermelho

[0.0366826156299841;0.291666666666667;0.00423728813559322;0.25;0;0.2058
82352941176;0.235294117647059]

Parâmetros

Conjunto A

Buffer: 18; Grade: [8 8]; Épocas: 5; Tipo de Malha: hexa; Inicialização: cjt0;
Vizinhança: [0.33 0.0033]

Conjunto Re

Buffer: 18; Grade: [8 8]; Épocas: 3; Tipo de Malha: hexa; Inicialização: cjt0;
Vizinhança: [0.66 0.0066]

Conjunto RP

Buffer: 18; Grade: [8 8]; Épocas: 2; Tipo de Malha: hexa; Inicialização: cjt0;
Vizinhança: [0.33 0.0033]

Conjunto Sp

Buffer: 18; Grade: [8 8]; Épocas: 2; Tipo de Malha: hexa; Inicialização: cjt0;
Vizinhança: [0.33 0.0033]

Conjunto Sn

Buffer: 18; Grade: [8 8]; Épocas: 2; Tipo de Malha: hexa; Inicialização: cjt0;
Vizinhança: [0.33 0.0033]

Conjunto LD

Buffer: 18; Grade: [8 8]; Épocas: 2; Tipo de Malha: hexa; Inicialização: cjt0;
Vizinhança: [0.33 0.0033]

Conjunto BP

Buffer: 18; Grade: [8 8]; Épocas: 2; Tipo de Malha: hexa; Inicialização: cjt0;
Vizinhança: [0.33 0.0033]

26/2/2008 04:04:39

Resultado Geral

0.885201793721973

Resultados Conjuntos

[0.94896331738437;1;0.75;0.75;0.75;1;0.911764705882353]

Semáforos

Verde

[0.566188197767145;0.3958333333333333;0.601694915254237;0.485294117647
059;0.647058823529412;0.529411764705882;0.647058823529412]

Amarelo

[0.397129186602871;0.3333333333333333;0.39406779661017;0.2647058823529
41;0.352941176470588;0.264705882352941;0.117647058823529]

Vermelho

[0.0366826156299841;0.2708333333333333;0.00423728813559322;0.25;0;0.2058
82352941176;0.235294117647059]

Parâmetros

Conjunto A

Buffer: 18; Grade: [8 8]; Épocas: 5; Tipo de Malha: hexa; Inicialização: cjto;
Vizinhança: [0.33 0.0033]

Conjunto Re

Buffer: 18; Grade: [8 8]; Épocas: 3; Tipo de Malha: quadrada; Inicialização: cjto;
Vizinhança: [0.66 0.0066]

Conjunto RP

Buffer: 18; Grade: [8 8]; Épocas: 2; Tipo de Malha: hexa; Inicialização: cjto;
Vizinhança: [0.33 0.0033]

Conjunto Sp

Buffer: 18; Grade: [8 8]; Épocas: 2; Tipo de Malha: hexa; Inicialização: cjto;
Vizinhança: [0.33 0.0033]

Conjunto Sn

Buffer: 18; Grade: [8 8]; Épocas: 2; Tipo de Malha: hexa; Inicialização: cjto;
Vizinhança: [0.33 0.0033]

Conjunto LD

Buffer: 18; Grade: [8 8]; Épocas: 2; Tipo de Malha: hexa; Inicialização: cjto;
Vizinhança: [0.33 0.0033]

Conjunto BP

Buffer: 18; Grade: [8 8]; Épocas: 2; Tipo de Malha: hexa; Inicialização: cjto;
Vizinhança: [0.33 0.0033]

APÊNDICE B – Experimentos feitos na bancada de circulação natural

Gráficos dos estados transitórios, obtidos via experimentação feita pelo autor desta dissertação na bancada de circulação natural da diretoria de reatores do IPEN.

Na Figura 39 está o esquema da configuração utilizada para os experimentos na bancada de circulação natural, com as localizações das variáveis que são expostas da Figura 40 à Figura 48.

As siglas “TC” indicam a posição dos medidores de temperatura, “Flow” indica vazão, “Pressure 1” é a pressão no sistema primário, “Pressure 2” é a pressão no sistema secundário.

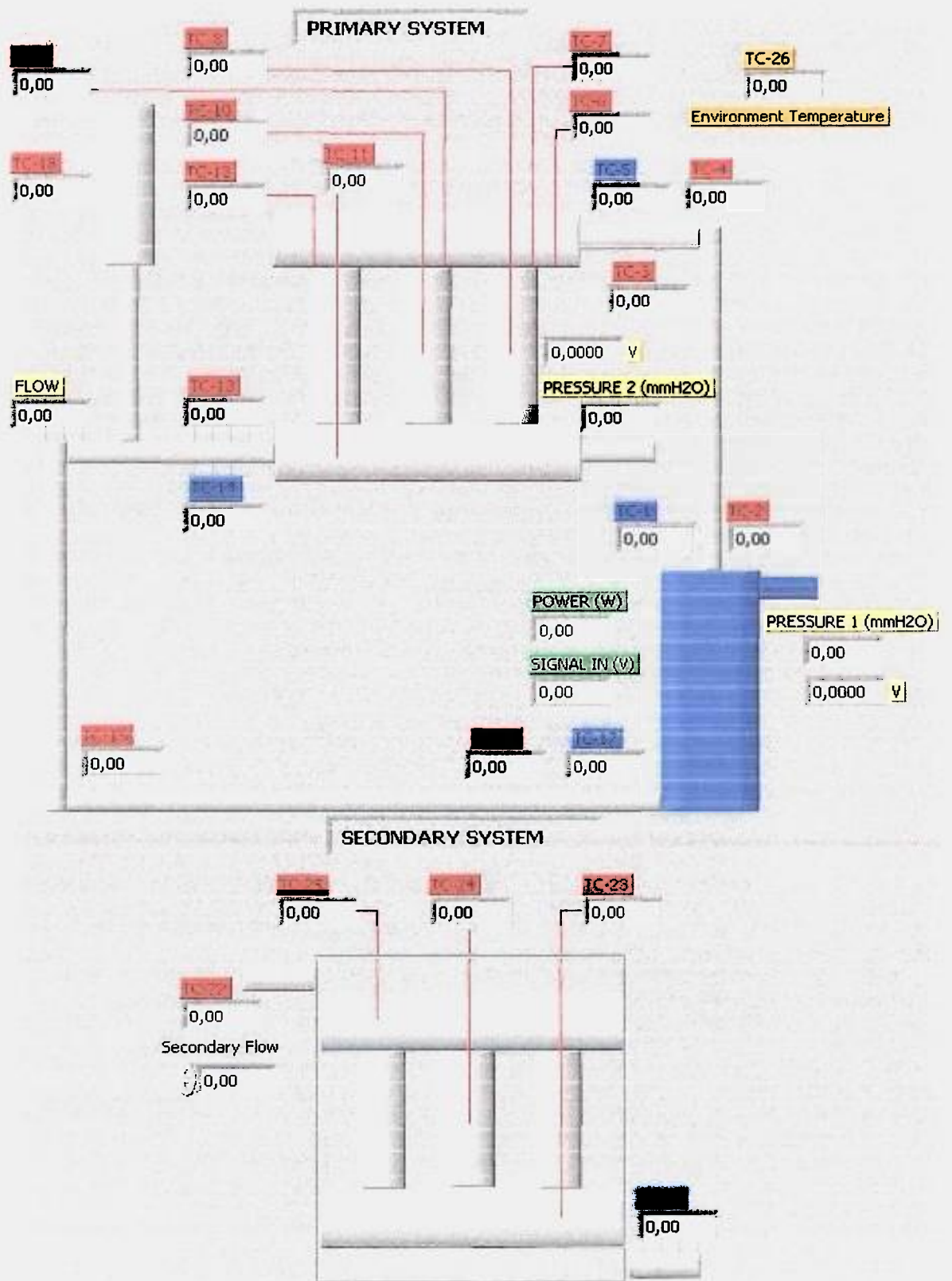


Figura 39 - Esquema da bancada de circulação natural

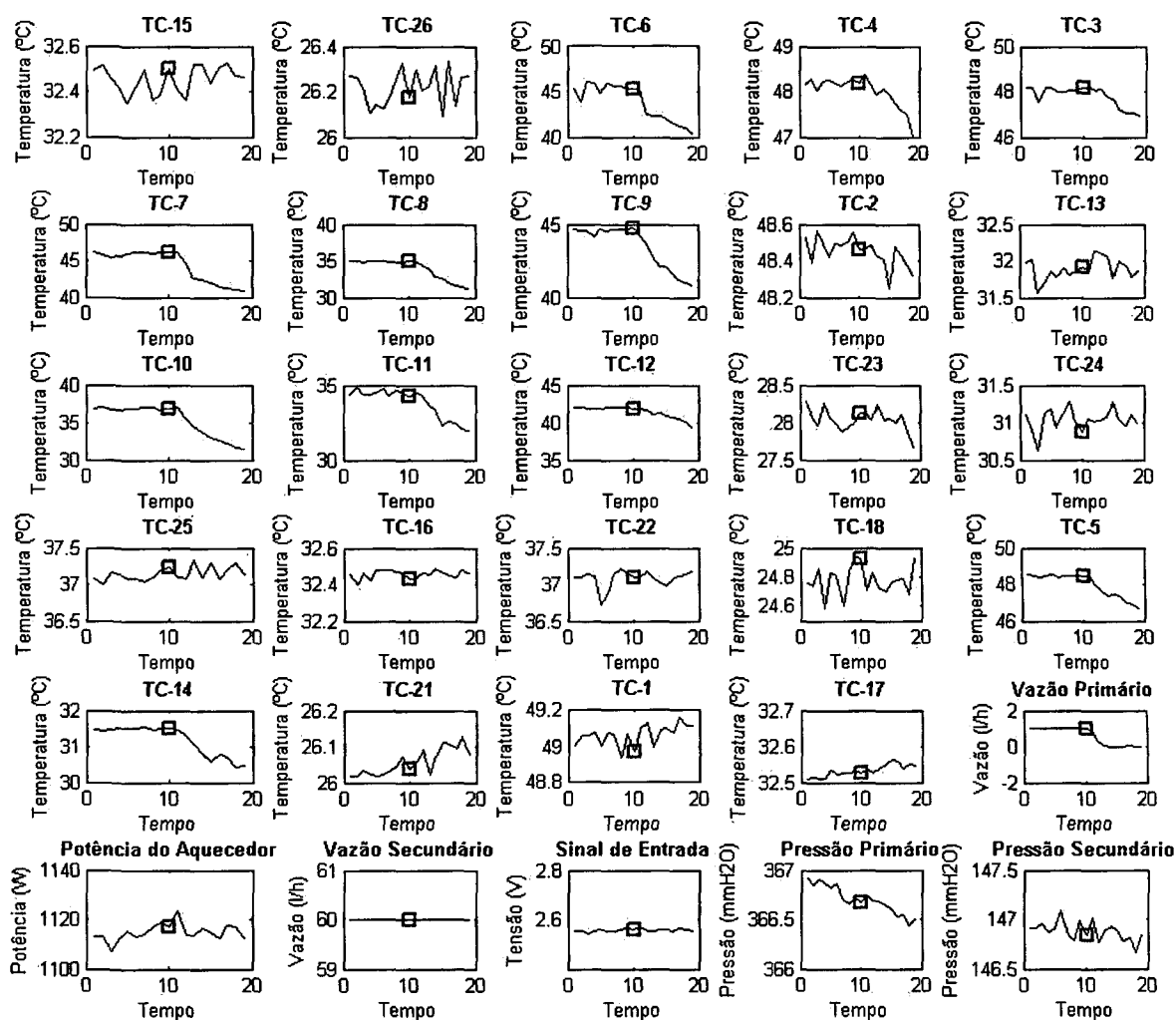


Figura 40 – Bloqueio de vazão do sistema primário, a 1000 W de potência e 60 l/h de vazão no sistema secundário.

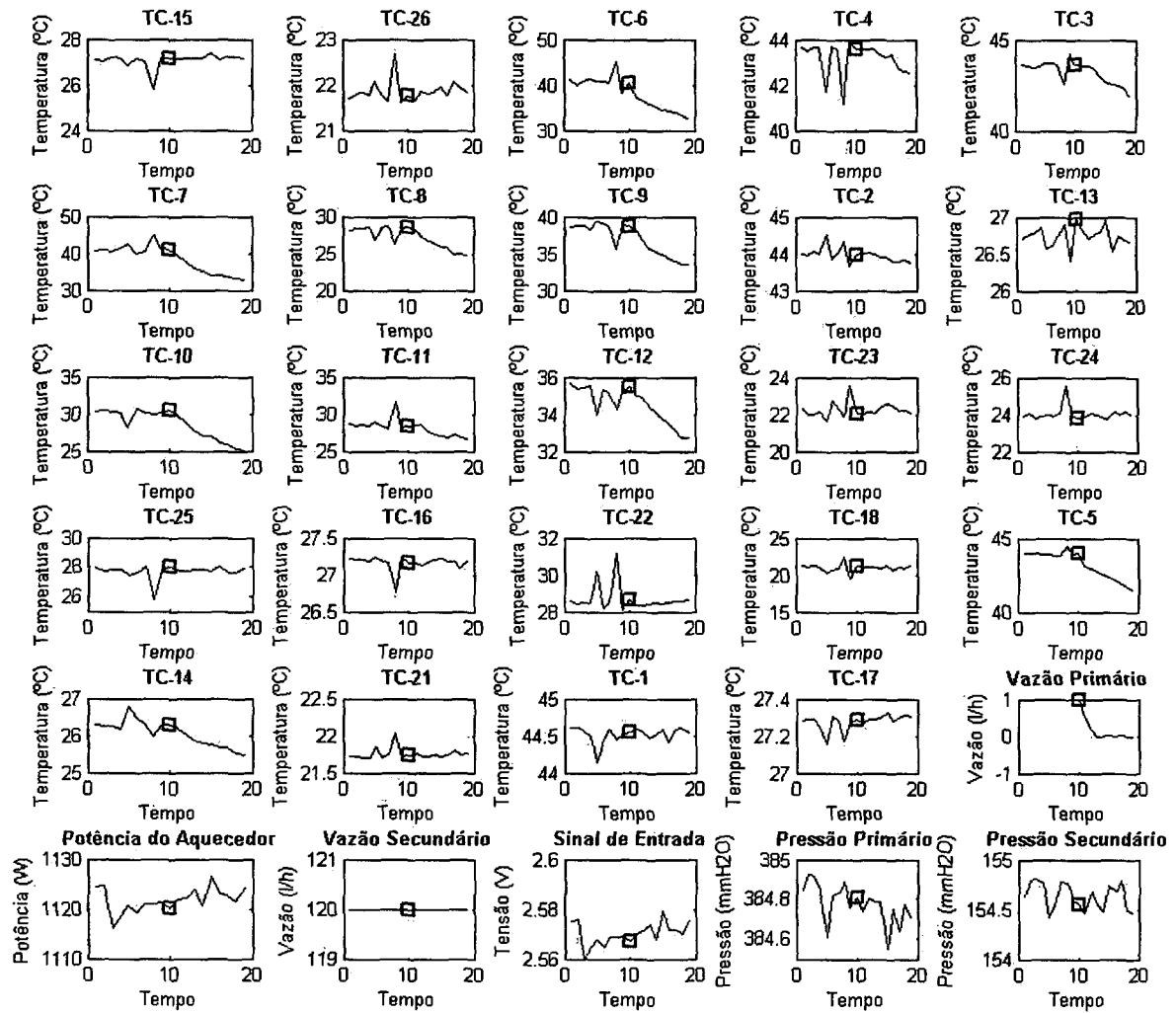


Figura 41 – Bloqueio de vazão do sistema primário, a 1000 W de potência e 120 l/h de vazão no sistema secundário.

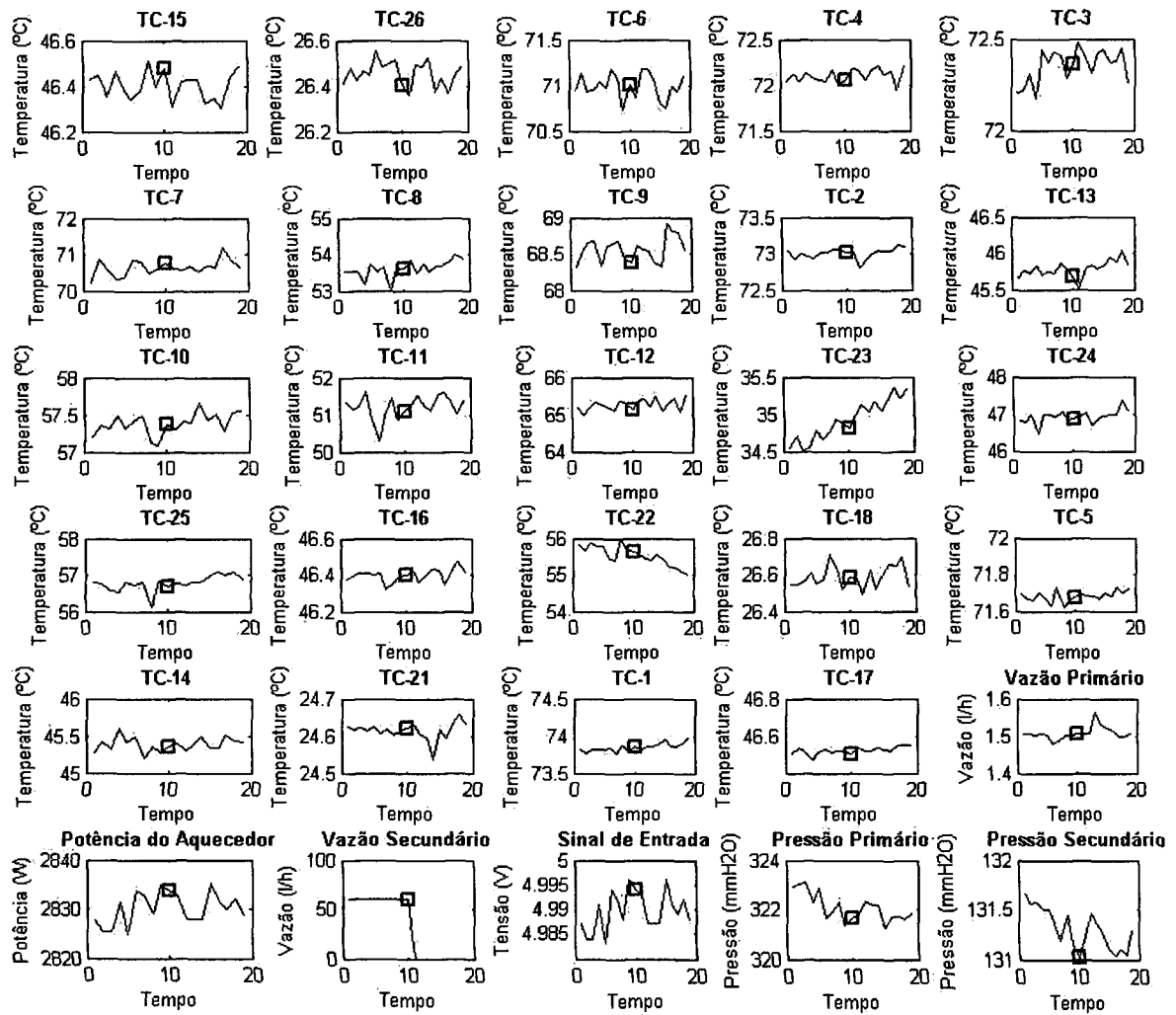


Figura 42 – Bloqueio de vazão do sistema secundário, a 2500 W de potência e 60 l/h de vazão no sistema secundário.

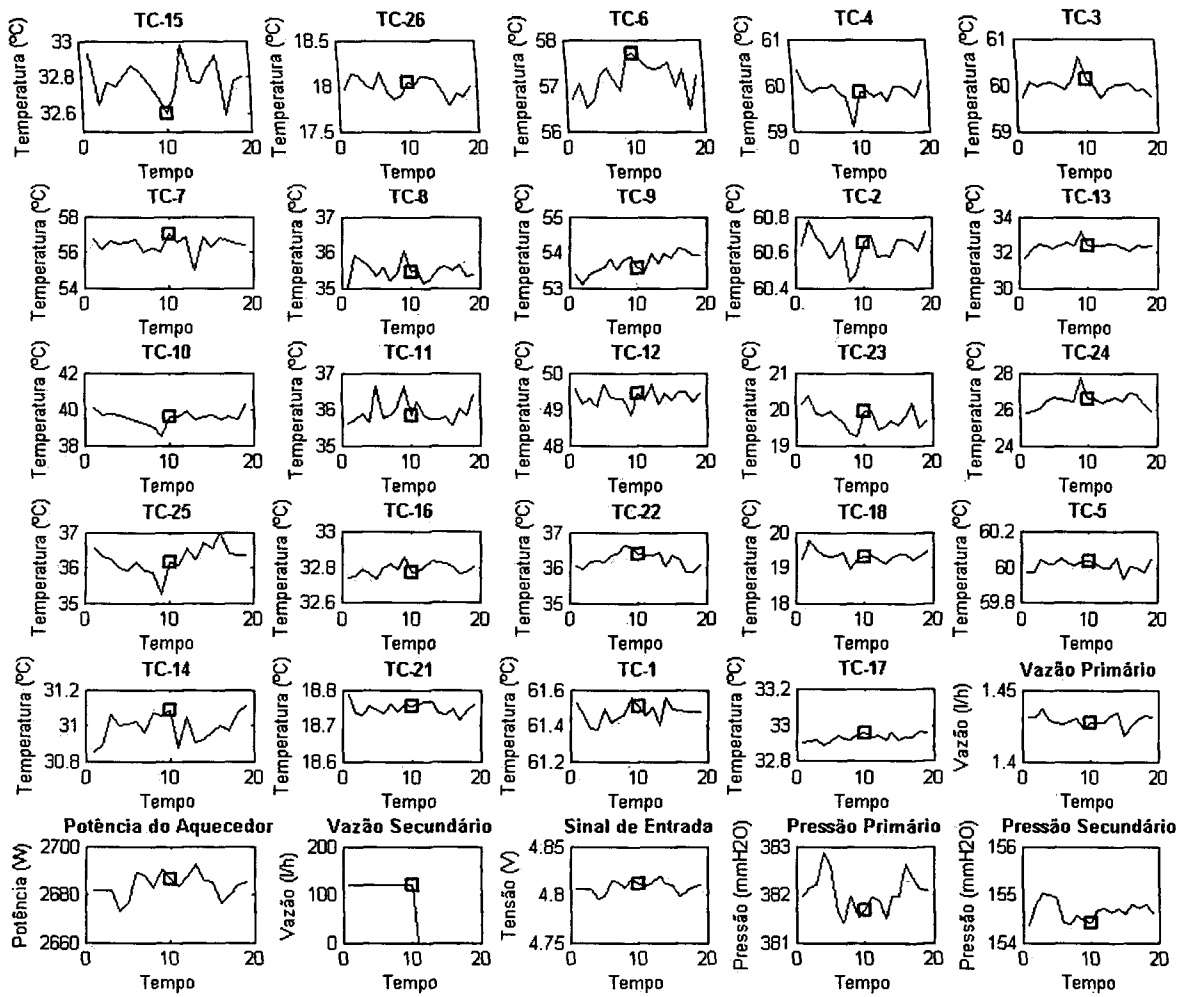


Figura 43 – Bloqueio de vazão do sistema secundário, a 2500 W de potência e 120 l/h de vazão no sistema secundário.

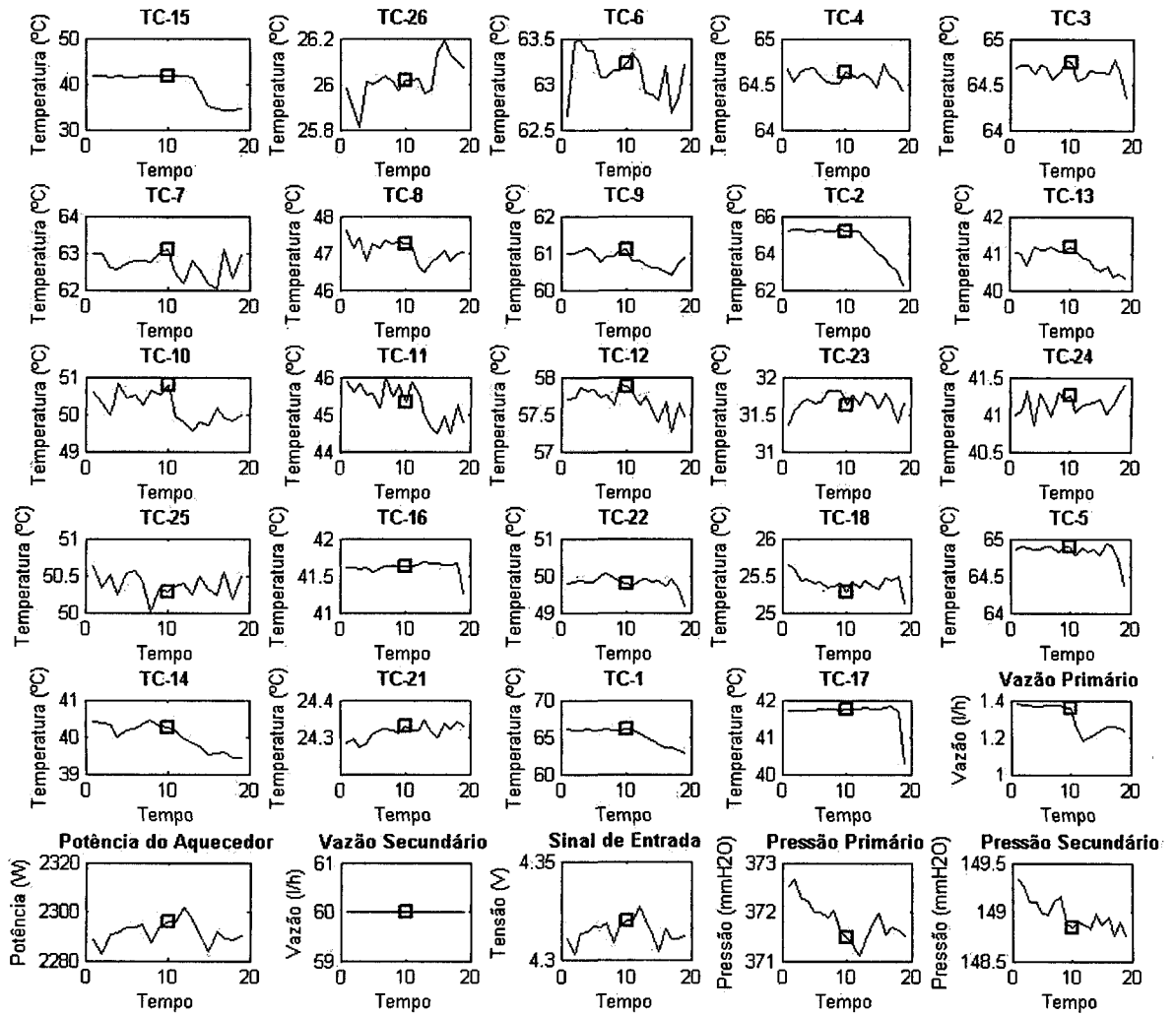


Figura 44 – Abertura de linha de desvio no sistema primário, a 2000 W de potência e 60 l/h de vazão no sistema secundário.

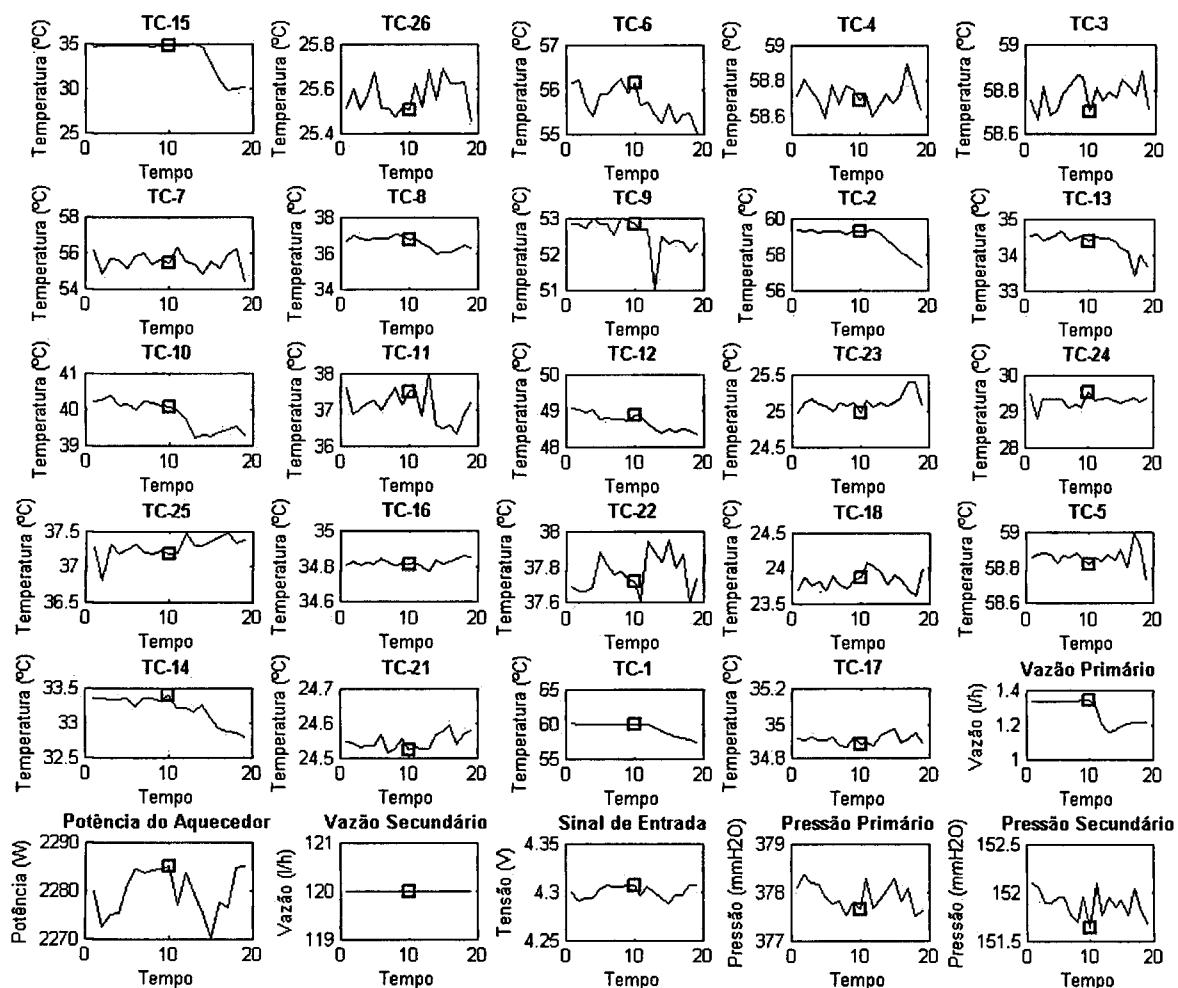


Figura 45 – Abertura de linha de desvio no sistema primário, a 2000 W de potência e 120 l/h de vazão no sistema secundário.

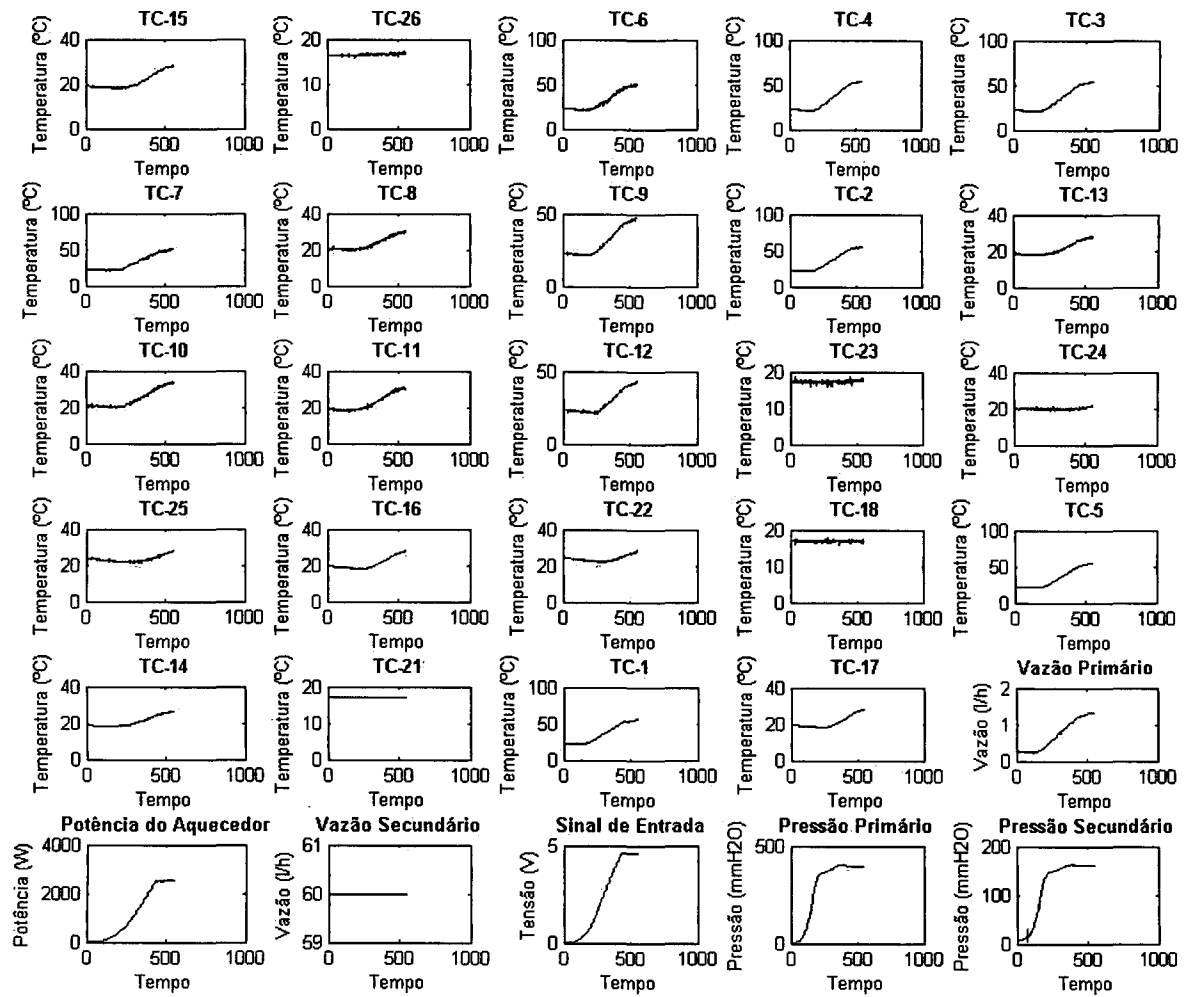


Figura 46 – Rampas positivas.

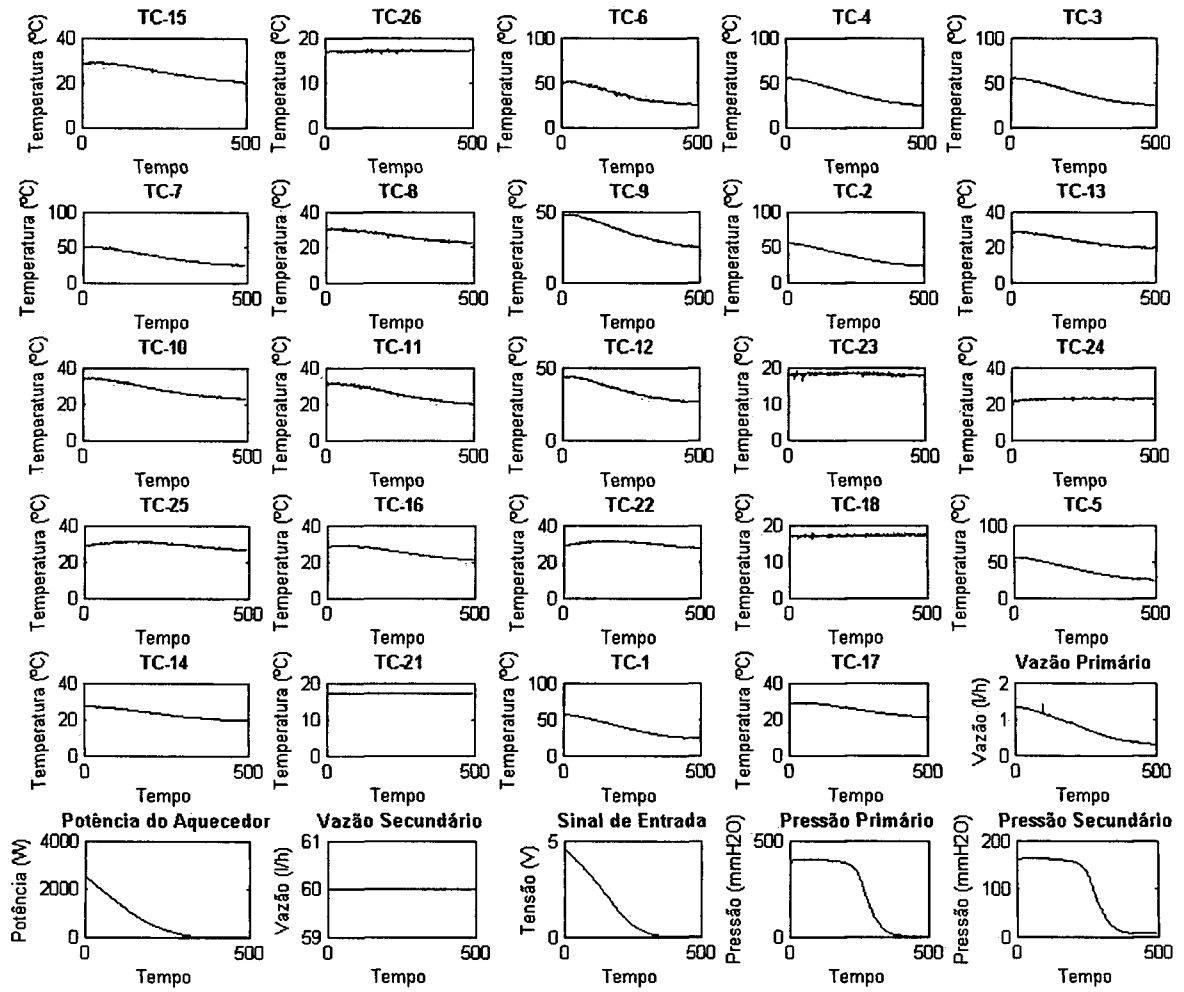


Figura 47 - Rampas negativas.

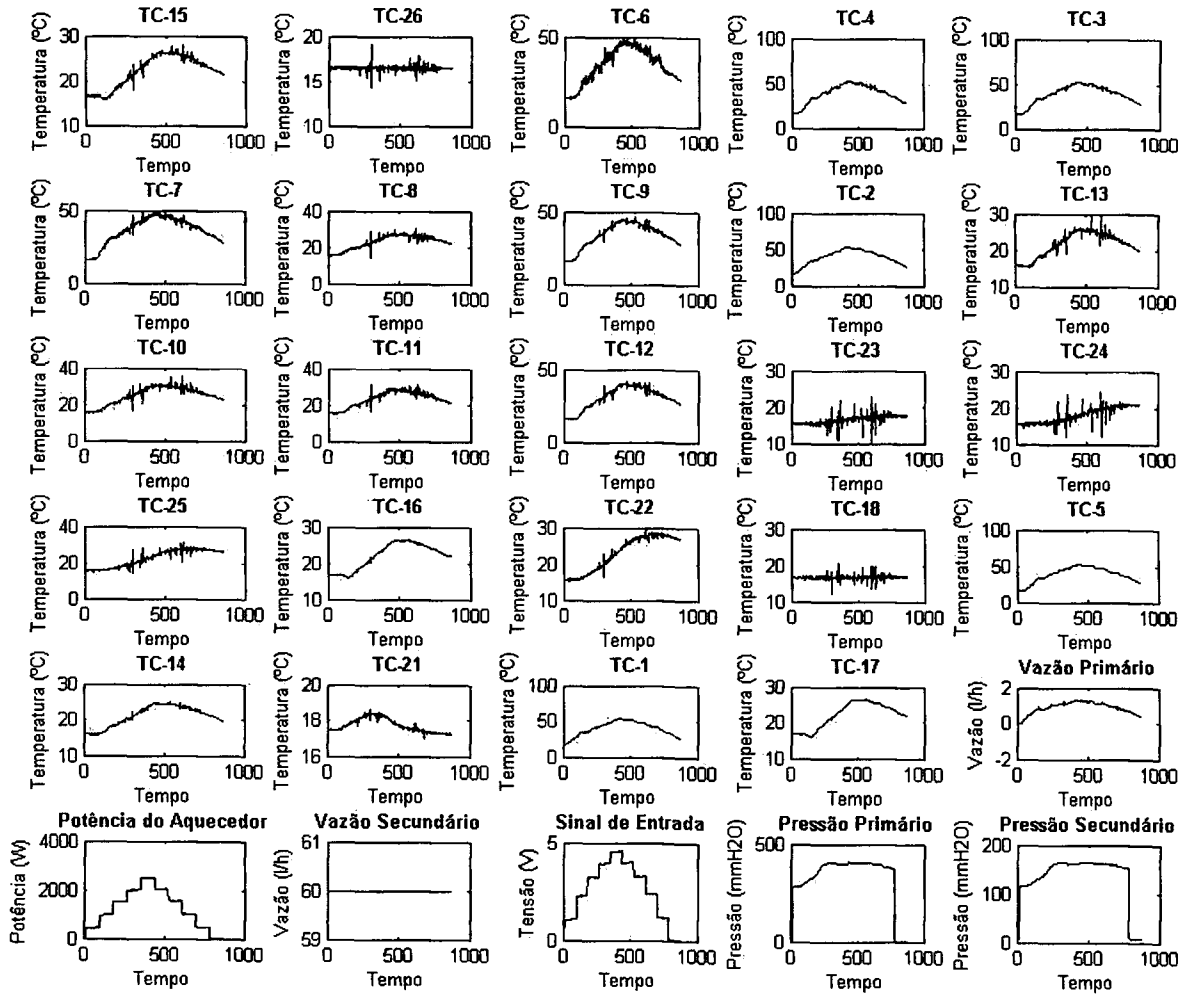


Figura 48 – Steps positivos e negativos.

BIBLIOGRAFIA

- [1] CARELLI, M. D., et al., "IRIS, International New Generation Reactor," In: 8TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON NUCLEAR ENGINEERING, BALTIMORE, USA, April 1-5, 2000. *Proceedings...*
- [2] CARELLI, M. D., et al, "IRIS Reactor Development". In: 9TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON NUCLEAR ENGINEERING, Nice, France, April 8-12, 2001. *Proceedings...*
- [3] CARELLI, M. D., et al, "Trade-off Studies for Defining the Characteristics of the IRIS Reactor Core," 16TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON STRUCTURAL MECHANICS IN REACTOR TECHNOLOGY, Washington, USA, August 12-17, 2001.
- [4] PETROVIC, B, et al. INTERNATIONAL COLLABORATION AND NEUTRONIC ANALYSES IN SUPPORT OF THE IRIS PROJECT, Trans. Am. Nucl. Soc. 83, pp. 186-187 (2000).
- [5] IPCC - INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (2000), Special Report on Emission Scenarios, A Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change, (<http://www.grida.no/climate/ipcc/emission/index.htm>), Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- [6] IAEA-TECDOC-1362," Guidance for the evaluation of innovative nuclear reactors and fuel cycles," Report of Phase IA of the International Project on Innovative Nuclear Reactors and Fuel Cycles (INPRO), 2003.
- [7] UNITED STATES DEPARTMENT OF ENERGY – US/DOE, The U.S. Generation IV Implementation Strategy, http://www.nuclear.gov/reports/Gen-IV_Implementation_Plan_9-9-03.pdf, September 2003.
- [8] ORIANI, L., et al. Thermal Hydraulic Tradeoffs in the Design of the IRIS Primary Circuit. In: 9TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON NUCLEAR ENGINEERING, Nice, France, April 8-12, 2001. *Proceedings...*
- [9] CONWAY, L. E., et al. Simplified Safety and Containment Systems for the IRIS Reactor. In: 9TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON NUCLEAR ENGINEERING, Nice, France, April 8-12, 2001. *Proceedings...*
- [10] CARELLI, M. D., ET AL. Safety by Design: A New Approach to Accident Management in the IRIS Reactor. IAEA-SR-218-36, IAEA INTL. SEMINAR ON STATUS AND PROSPECTS OF SMALL AND MEDIUM SIZED REACTORS, Cairo, Egypt, May 27-31, 2001.
- [11] BAPTISTA FILHO, B. D.; BARROSO, A. C. O.; ARONE, I. D.; MACEDO, L. A.; SAMPAIO, P. A. B.; MORAES, M. Iris pressurizer design. In: THE INTERNATIONAL CONGRESS ON ADVANCES IN NUCLEAR POWER PLANTS (ICAPP '03), Córdoba. 2003. v. 1, p. 1-10. *Proceedings...*
- [12] BARROSO, A. C. O.; BAPTISTA FILHO, B. D.; CARELLI, M. D. The IRIS reactor design - An International Cooperative Project and the Brazilian participation. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INNOVATIVE TECHNOLOGIES FOR NUCLEAR FUEL CYCLES AND NUCLEAR POWER, Vienna. Innovative Technologies for Nuclear Power, IAEA-CN-108. Vienna, Austria: International Atomic Energy Agency - International Nuclear Information System, 2003. v. 1. *Proceedings...*

- [13] BARROSO, A. C. O.; BAPTISTA FILHO, B. D.; PALMIERI, E. T.; SABUNDJIAN, G.; ANDRADE, D. A.; MACEDO, L. A.. CNEN in the IRIS Project. In: LAS-ANS SYMPOSIUM 2002: POWER SUPPLY AND ITS CHALLENGES – THE NUCLEAR PROPOSAL, 2002, Rio de Janeiro. LAS-ANS Symposium 2002. 2002. v. 1, p. 1-7. *Proceedings...*
- [14] KOHONEN, T., Self-Organized Formation of Topologically Correct Feature Maps, *Biological Cybernetics*, v.43, p. 59-69, 1982.
- [15] KOHONEN, T. *Self-Organizing Maps*. Third Extended Edition, New York: Springer, 2001.
- [16] ALHONIEMI, E.; HOLLMÉN, J.; SIMULA, O.; VESANTO, J. Process Monitoring and Modeling Using Self-Organizing Map. INTEGRATED COMPUTER AIDED ENGINEERING, Volume 6, Number 1, IOS Press, 1999 p. 3-14.
- [17] FLEXER A.: Statistical Evaluation of Neural Network Experiments: Minimum Requirements and Current Practice. In: 13TH EUROPEAN MEETING ON CYBERNETICS AND SYSTEMS RESEARCH. Austrian Society for Cybernetic Studies, Vienna, 2 vols., pp.1005 1008, 1996. *Proceedings...*
- [18] SMITH, L. I. A tutorial on Principal Component Analysis, 26/02/2002. Disponível em 2/11/2007 em: http://csnet.otago.ac.nz/cosc453/student_tutorials/principal_components.pdf.
- [19] HAYKIN, S. *Redes Neurais Princípios e Prática*. 2ª Edição, Editora Bookman.
- [20] BAPTISTA FILHO, B. D. *Redes neurais para controle de sistemas de reatores nucleares*. 1998. Tese (Doutorado) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo.
- [21] OJA, M.; KASKI, S.; KOHONEN, T. Bibliography of Self-Organizing Map (SOM) Papers: 1998-2001 Addendum, NEURAL COMPUTING SURVEYS, Helsinki University of Technology, 2002. Disponível em: <http://www.icsi.berkeley.edu/jagota/NCS>.
- [22] NUREG/CR-5535-VI, Relap5/mod3 Code Manual, Volumes I to V, Idaho National Engineering Laboratory, June 1995.
- [23] HUNNS, D.M.; WAINWRIGTH, N. (1991) Software-based Protection for Sizewell B: The Regulator's Perspective. NUCLEAR ENGINEERING INTERNATIONAL, p. 38-40, Sept. 1991.
- [24] BAPTISTA FILHO, B. D.. Correlação de Propriedades Termodinâmicas da Água utilizando Redes Neurais Artificiais. In: XIII ENFIR – NATIONAL MEETING OF REACTOR PHYSICS AND THERMAL HYDRAULICS, INAC 2002 (International Nuclear Atlantic Conference), Rio de Janeiro, 2002. v. 1, p. 1-6. *Proceedings...*
- [25] BAPTISTA FILHO, B. D.. Redes Neurais Artificiais na Engenharia Nuclear (Parte 1). In: XIII ENFIR – NATIONAL MEETING OF REACTOR PHYSICS AND THERMAL HYDRAULICS, INAC 2002 (International Nuclear Atlantic Conference), Rio de Janeiro, 2002. v. 1, p. 1-6. *Proceedings...*
- [26] BAPTISTA FILHO, B. D.. Redes Neurais Artificiais na Engenharia Nuclear (Parte 2). In: XIII ENFIR – NATIONAL MEETING OF REACTOR PHYSICS AND THERMAL HYDRAULICS, INAC 2002 (International Nuclear Atlantic Conference), Rio de Janeiro, 2002. v. 1, p. 1-6. *Proceedings...*
- [27] GARCIA, M. B.; SOARES, A. J.; BAPTISTA FILHO, B. D.. Utilização de Cintiladores Plásticos em Sistemas de Detecção Sensíveis à Posição. In: VI ENAN – NATIONAL MEETING ON NUCLEAR APPLICATIONS, 2002, Rio de Janeiro. INAC 2002 - International Nuclear Atlantic Conference - VI ENAN. 2002. v. 1, p. 1-6. *Proceedings...*

- [28] BAPTISTA FILHO, B. D.; CABRAL, E. L. L. Um Novo Conceito de Redes Neurais Artificiais para Controle de Sistemas de Reatores Nucleares. In: **V Brazilian Conference on Neural Networks**, 2001, Rio de Janeiro. *Proceedings...*
- [29] BAPTISTA FILHO, B. D. A new neural network concept for control of nuclear reactors systems. In: EIGHTH INTERNATIONAL CONFERENCE ON NUCLEAR ENGINEERING (ICONE-8), 2000, Baltimore. 2000. *Proceedings...*
- [30] BAPTISTA FILHO, B. D. Utilização do Conceito de Redes Neurais com Contatos Sinápticos Múltiplos no Controle de Trajetória de um Manipulador Bi-articulado. In: CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA, CONEM2000, Natal, 2000. *Proceedings...*
- [31] BAPTISTA FILHO, B. D.; CABRAL, E. L. L. Controle de um Manipulador Bi-articulado com uma Rede Neural de Contatos Multi-Sinápticos. Anais do 4o SIMPÓSIO BRASILEIRO DE AUTOMAÇÃO INTELIGENTE (4o SBAI). São Paulo: SBAI, 1999. p. 119-124.
- [32] BIANCHI, P. H.; BAPTISTA FILHO, B. D. Sistema de identificação e classificação de transientes em usinas nucleares utilizando mapas auto-organizáveis. In: VIII CONGRESSO BRASILEIRO DE REDES NEURAS, 8 a 11 de outubro, 2007, Florianópolis, Santa Catarina. 1 CD-ROM.
- [33] BAPTISTA F., B.D., BARROSO, A.C.O., "Identification of IRIS Reactor Transients with Self-Organized Maps ", Paper 1185, GENES4/ANP2003 Conference, Sep. 15-19, 2003, Kyoto, JAPAN.
- [34] BAPTISTA FILHO, B. D.; BARROSO, A. C. O. Identification of IRIS Reactor Transients with Self-Organized Maps. In: GLOBAL 2003 – ATOMS FOR PROSPERITY: UPDATING EISENHOWER'S GLOBAL VISION FOR NUCLEAR ENERGY, New Orleans, USA, Nov. 16-20, 2003. *Proceedings...*
- [35] MOL, A. C. A.; ALMEIDA, J. C. S.; PEREIRA, C. M. N. A.; MARINS, E. R.; LAPA, C. M. F. Neural and genetic-based approaches to nuclear transient identification including 'don't know' response. PROGRESS IN NUCLEAR ENERGY 48, p. 268 – 282. 2006. Disponível em Elsevier: www.sciencedirect.com.
- [36] SANTOSH, T. V.; VINOD, G.; SARAF, R. K.; GHOSH, A. K.; KUSHWAHA, H. S. Application of artificial neural networks to nuclear power plant transient diagnosis. RELIABILITY ENGINEERING AND SYSTEM SAFETY 92, p. 1468 – 1472. 2007. Disponível em Elsevier: www.sciencedirect.com.
- [37] LEMOS, R. A.; NAKAMURA, M.; KUWANO, H. Applying a Self-organizing Map to Sensor-Array Characterization. 1993 INTERNATIONAL JOINT CONFERENCE ON NEURAL NETWORKS. *Proceedings...*
- [38] SIMULA, O.; ALHONIEMI, E.; HOLLMÉN, J.; VESANTO, J. Monitoring and modeling of complex processes using hierarchical self-organizing maps. IEEE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON VOLUME SUPPLEMENT, Issue 12-15 May 1996 p. 73 – 76. *Proceedings...*
- [39] VAN DEVENTER, J. S. J.; ALDRICH, C.; MOOLMAN, D. W. The Tracking of Changes in Chemical Processes Using Computer Vision and Self-organizing Maps. IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON NEURAL NETWORKS, Issue Nov/Dec 1995 p. 3068 - 3073 vol.6. *Proceedings...*
- [40] TSE, P.; WANG, D. D. Improving Learning Vector Quantization Classifier in Machine Fault Diagnosis by Adding Consistency. IEEE International Conference on Neural Networks, p. 927-931 vol.2, 1995. *Proceedings...*
- [41] HARRIS, T.; GAMLYN, L.; SMITH, P.; MACINTYRE, J.; BRASON, A.; PALMER, R.; SMITH, H.; SLATER, A. 'NEURAL-MAINE': Intelligent On-Line Multiple Sensor Diagnostics For Steam Turbines

In Power Generation. IEEE International Conference on Neural Networks, p. 686-691 vol.2, 1995.
Proceedings...