



AUTARQUIA ASSOCIADA À UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

**MONITORAÇÃO E DIAGNÓSTICO PARA DETECÇÃO DE
FALHAS DE SENSORES UTILIZANDO A
METODOLOGIA GMDH**

IRACI MARTINEZ PEREIRA GONÇALVES

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

Orientador:
Dr. Daniel Kao Sun Ting

São Paulo
2006

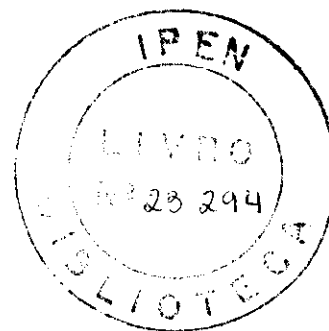


INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES

Autarquia associada à Universidade de São Paulo

**MONITORAÇÃO E DIAGNÓSTICO PARA DETECÇÃO DE FALHAS
DE SENSORES UTILIZANDO A METODOLOGIA GMDH**

IRACI MARTINEZ PEREIRA GONÇALVES



Tese apresentada como parte dos
requisitos para obtenção do Grau de
Doutor em Ciências na Área de
Tecnologia Nuclear – Reatores.

Orientador: Dr. Daniel Kao Sun Ting

São Paulo
2006

*aos meus filhos, Cyro e Isabel
meus amores, minha vida*

AGRADECIMENTOS

Ao Dr. Daniel Kao Sun Ting, pela orientação da tese, realizada com dedicação e esmero e pelas valiosas discussões técnicas, indo a fundo nos detalhes, contribuindo para a qualidade do trabalho.

Ao Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN/CNEN-SP), em especial ao Centro de Engenharia Nuclear (CEN) por toda a infra-estrutura fornecida e pela oportunidade concedida.

Ao Dr. Belle R. Upadhyaya do Departamento de Engenharia Nuclear da Universidade do Tennessee pela consideração, exemplo, cooperação e apoio científico demonstrados durante a execução desse trabalho.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo suporte financeiro na aquisição de materiais como parte do Projeto *Sistema de Monitoração e Diagnóstico para o Reator de Pesquisas do Ipen* (Processo número 401153/03-7).

Ao grupo de operação do reator de pesquisas do Ipen IEA-R1 pelos dados de operação, em especial ao colega Walter Ricci pela boa vontade demonstrada na disponibilização dos dados do SAD.

Ao Dr. Benedito Dias Baptista Filho pelo incentivo e pelos valiosos comentários e sugestões apresentados durante as etapas de desenvolvimento do trabalho.

Aos colegas do Centro de Engenharia Nuclear, em especial aos colegas do Grupo de Monitoração e Diagnóstico.

Ao colega Paulo Henrique Ferraz Masotti pelas valiosas discussões técnicas e pelo incentivo constante.

Aos queridos amigos Roberto Carlos e Margaret pelo apoio e incentivo.

MONITORAÇÃO E DIAGNÓSTICO PARA DETECÇÃO DE FALHAS DE SENSORES UTILIZANDO A METODOLOGIA GMDH

Iraci Martinez Pereira Gonçalves

RESUMO

O sistema de detecção de falhas e diagnóstico é um sistema de suporte ao operador dedicado a funções específicas que alertam os operadores para problemas de falhas em sensores e atuadores, e auxiliam no diagnóstico antes que os limites normais de alarmes sejam atingidos. Sistemas de suporte ao operador surgiram para diminuir a complexidade dos painéis causada pelo grande aumento de informação disponível nas salas de controle das centrais nucleares.

Neste trabalho foi desenvolvido um Sistema de Monitoração e Diagnóstico utilizando a metodologia GMDH (Group Method of Data Handling) aplicado ao reator de pesquisas do Ipen IEA-R1. O sistema faz a monitoração, comparando os valores calculados pelo modelo GMDH com os valores medidos. A metodologia desenvolvida foi aplicada inicialmente em modelos teóricos: um modelo teórico de trocador de calor e um modelo teórico do reator IEA-R1. Os resultados obtidos com os modelos teóricos propiciaram uma base para a aplicação da metodologia aos dados de operação do reator. Para a monitoração de dados de operação foram desenvolvidos três modelos GMDH: o primeiro utilizou apenas variáveis de processo, o segundo modelo foi desenvolvido considerando-se algumas variáveis nucleares e três variáveis de temperatura, e o terceiro modelo GMDH considerou todas as variáveis possíveis. Os três modelos apresentaram resultados excelentes, mostrando amplamente a viabilidade da utilização da metodologia GMDH na monitoração de dados de operação. A comparação entre os resultados dos três modelos desenvolvidos mostrou ainda a capacidade da metodologia GMDH de escolher as melhores variáveis para otimização do modelo. Para a implementação de um sistema de diagnóstico, foram adicionadas falhas sinteticamente aos valores das variáveis de temperatura. Os valores de falhas correspondem a uma descalibração da temperatura e o resultado da monitoração de dados com falhas foi utilizado para a elaboração de um sistema de diagnóstico simples e objetivo baseado na lógica nebulosa.

MONITORING AND DIAGNOSIS FOR SENSOR FAULT DETECTION USING GMDH METHODOLOGY

Iraci Martinez Pereira Gonçalves

ABSTRACT

The fault detection and diagnosis system is an Operator Support System dedicated to specific functions that alerts operators to sensors and actuators fault problems, and guide them in the diagnosis before the normal alarm limits are reached. Operator Support Systems appears to reduce panels complexity caused by the increase of the available information in nuclear power plants control room.

In this work a Monitoring and Diagnosis System was developed based on the GMDH (Group Method of Data Handling) methodology. The methodology was applied to the Ipen research reactor IEA-R1. The system performs the monitoring, comparing GMDH model calculated values with measured values. The methodology developed was firstly applied in theoretical models: a heat exchanger model and an Ipen reactor theoretical model. The results obtained with theoretical models gave a base to methodology application to the actual reactor operation data. Three GMDH models were developed for actual operation data monitoring: the first one using just the thermal process variables, the second one was developed considering also some nuclear variables, and the third GMDH model considered all the reactor variables. The three models presented excellent results, showing the methodology utilization viability in monitoring the operation data. The comparison between the three developed models results also shows the methodology capacity to choose by itself the best set of input variables for the model optimization. For the system diagnosis implementation, faults were simulated in the actual temperature variable values by adding a step change. The fault values correspond to a typical temperature descalibration and the result of monitoring faulty data was then used to build a simple diagnosis system based on fuzzy logic.

SUMÁRIO

	Página
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 OBJETIVO.....	4
2.1 Aspectos relevantes e contribuições do trabalho.....	5
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	6
4 METODOLOGIA GMDH.....	9
4.1 Descrição da metodologia GMDH.....	10
4.2 Variações da metodologia GMDH.....	15
4.2.1 Uso de funções racionais.....	15
4.2.2 Critério de seleção do modelo.....	15
4.3 Comparação entre GMDH e Redes Neurais.....	18
5 SISTEMA DE MONITORAÇÃO E DIAGNÓSTICO.....	20
5.1 Implementação do sistema de monitoração e diagnóstico.....	21
5.2 Aplicação da metodologia.....	24
6 BASE DE DADOS EXPERIMENTAIS.....	29
6.1 Modelo teórico do trocador de calor.....	29
6.2 Modelo teórico do reator IEA-R1.....	32
6.3 O reator IEA-R1.....	36
6.3.1 Sistema de Aquisição de Dados SAD.....	40
6.3.2 Banco de dados do reator IEA-R1.....	41
6.3.3 Sistema de aquisição de dados em paralelo.....	43

7 RESULTADOS	45
7.1 Resultados do modelo teórico do trocador de calor	45
7.1.1 Precisão.....	46
7.1.2 Normalização.....	48
7.1.3 Influência do número de observações	49
7.1.4 Variação do nível de ruído	50
7.2 Resultados do modelo teórico do reator IEA-R1	52
7.2.1 Determinação do modelo GMDH.....	52
7.2.2 Monitoração.....	55
7.2.3 Monitoração de dados com falhas	60
7.3 Resultados com dados de operação	69
7.3.1 Modelo 1.....	70
7.3.2 Modelo 2.....	79
7.3.3 Modelo 3.....	84
7.3.4 Comparação entre os 3 modelos.....	92
7.3.5 Dados com falha.....	94
7.3.6 Sistema Fuzzy.....	101
8 ANÁLISE DOS RESULTADOS	105
8.1 Modelo teórico de trocador de calor.....	105
8.2 Modelo teórico do reator IEA-R1.....	105
8.3 Dados de operação.....	106
8.4 Dados com falha.....	109
9 CONCLUSÕES.....	111
9.1 Recomendações para trabalhos futuros	113
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	114

LISTA DE TABELAS

Tabela	Título	Página
1	Comparação entre Redes Neurais e GMDH.....	19
2	Dados do trocador de calor.....	30
3	Dados de operação do trocador de calor.....	31
4	Variáveis do modelo teórico do reator IEA-R1.....	32
5	Variáveis do SAD.....	40
6	RMIN e geração correspondente para base de dados sem ruído.....	54
7	RMIN e geração correspondente para base de dados com ruído.....	54
8	RMIN e geração correspondente para dados de modelo 1.....	70
9	Descrição das variáveis utilizadas no modelo 2.....	79
10	RMIN e geração correspondente para as variáveis do modelo 2.....	80
11	Descrição das variáveis do modelo 3.....	84
12	RMIN e geração correspondente para as variáveis do modelo 3.....	86

LISTA DE FIGURAS

Figura	Título	Página
1	Curva RMIN calculado a cada geração.....	13
2	Estrutura do modelo auto-organizável GMDH com m entradas e k gerações.....	14
3	Sistema de monitoração e diagnóstico.....	20
4	Primeira etapa da implantação do sistema de monitoração e diagnóstico: Determinação do modelo GMDH.....	21
5	Segunda etapa da implantação do sistema de monitoração e diagnóstico: Monitoração e Cálculo do resíduo.....	22
6	Terceira etapa de implantação do sistema de monitoração e diagnóstico: Detecção e identificação da falha.....	23
7	Fluxograma do programa GMDH.....	26
8	Fluxograma do programa Monitora.....	27
9	Fluxograma do programa Diagnóstico.....	28
10	Esquema do trocador de calor.....	29
11	Interface do programa desenvolvido para calcular as variáveis do modelo teórico do reator IEA-R1.....	34
12	Fluxograma de processo do reator IEAR1.....	39
13	Tela de consulta de ano, mês e semana de operação do Banco de Dados do reator IEA-R1.....	43
14	Tela do programa de aquisição de dados.....	44
15	RMIN em função de alfa e do número de observações.....	48
16	Comparação entre RMIN para dados normalizados e não normalizados....	49
17	Variação de RMIN em função do número de observações.....	49
18	Variável com ruído de 10%.....	50
19	RMIN para diferentes níveis de ruído nos dados de entrada.....	51
20	Base de dados para 10 condições de operação (sem ruído).....	53
21	Base de dados para 10 condições de operação (com ruído).....	53
22	Comparação entre os valores calculados e estimados pelo GMDH da variável T1 do modelo teórico do reator IEA-R1.....	56
23	Valor dos resíduos da variável T1 do modelo teórico do reator IEA-R1....	57

24	Mapa de Resíduos. Resíduos obtidos na monitoração de dados sem ruído gerados pelo modelo teórico do reator IEA-R1.....	58
25	Mapa de Resíduos. Resíduos obtidos na monitoração de dados gerados pelo modelo teórico do reator IEA-R1. Temperaturas: ruído de 0,4%; vazão no secundário (ms), ruído de 2% e vazão no primário (mp) ruído de 1%.....	59
26	Mapa de resíduos para condição de falha em T1.....	61
27	Mapa de resíduos para condição de falha em T2.....	62
28	Mapa de resíduos para condição de falha em T3.....	62
29	Mapa de resíduos para condição de falha em T4.....	63
30	Mapa de resíduos para condição de falha em T6.....	63
31	Mapa de resíduos para condição de falha em T7.....	64
32	Mapa de resíduos para condição de falha em T8.....	64
33	Mapa de resíduos para condição de falha em T9.....	65
34	Mapa de resíduos para condição de falha em ms.....	65
35	Mapa de resíduos para condição de falha em mp.....	66
36	Interface desenvolvida para monitoração e diagnóstico dos dados gerados pelo modelo teórico do reator IEA-R1.....	67
37	Comparação entre o valor lido e valor estimado pelo GMDH para temperatura T1. Dados de operação do reator IEA-R1.....	72
38	Resíduos da variável T1. Dados de operação do reator IEA-R1.....	73
39	Mapa de resíduos para dados de operação do reator IEA-R1. Modelo 1.....	74
40	Comparação entre o valor lido e valor estimado pelo GMDH para temperatura T1. Dados de operação do reator IEA-R1.....	76
41	Resíduos da variável T1. Dados de operação do reator IEA-R1.....	77
42	Mapa de resíduos para dados de operação do reator IEA-R1. Base de dados, semana 1 e semana 2. Modelo 1.....	78
43	Comparação entre o valor lido e valor estimado pelo GMDH para R1. Dados de operação do reator IEA-R1.....	81
44	Resíduos da variável R1. Dados de operação do reator IEA-R1.....	82
45	Mapa de resíduos para dados de operação do reator IEA-R1. Modelo 2.....	83
46	Mapa de resíduos para dados de operação do reator IEA-R1. Modelo 3.....	88
47	Mapa de resíduos para dados de operação do reator IEA-R1. Modelo 3.....	89

48	Mapa de resíduos para dados de operação do reator IEA-R1. Modelo 3.....	90
49	Mapa de resíduos para dados de operação do reator IEA-R1. Modelo 3.....	91
50	Comparação entre os resultados dos modelos 1, 2 e 3.....	93
51	Dados com falha.....	95
52	Mapa de resíduos para falha em T1.....	96
53	Mapa de resíduos para falha em T2.....	97
54	Mapa de resíduos para falha em T3.....	97
55	Mapa de resíduos para falha em T4.....	98
56	Mapa de resíduos para falha em T6.....	98
57	Mapa de resíduos para falha em T7.....	99
58	Mapa de resíduos para falha em T8.....	99
59	Mapa de resíduos para falha em T9.....	100
60	Função de pertinência das variáveis de entrada.....	102
61	Função de pertinência das variáveis de saída.....	103
62	Visualização das regras do sistema fuzzy.....	104

1 INTRODUÇÃO

Os sistemas de instrumentação e controle de uma usina nuclear são os "olhos e ouvidos" do operador. Se forem adequadamente planejados, projetados, construídos e mantidos, fornecem informação precisa e apropriada, e permitem ações judiciosas durante ambas condições de operação normal e anormal. Eles são, portanto, juntamente com o operador, vitais para a operação segura e eficiente da usina. Sob condições normais de operação eles fornecem o controle automático, permitindo que o operador tenha tempo para observar o comportamento da usina e monitorar o que está acontecendo. Além disso, a instrumentação ligada ao sistema de proteção do reator garante que a usina não sofrerá as conseqüências de qualquer erro que o operador ou o sistema automático de controle possam tomar.

A sala de controle de uma usina nuclear centraliza as informações necessárias para monitorar e controlar a usina. Contudo, o aumento no tamanho e complexidade das centrais nucleares tem influenciado grandemente os requisitos operacionais das salas de controle, pois devido ao grande número de informação disponível, o número de indicadores, alarmes, etc., tem crescido substancialmente. Por outro lado, a tendência atual das salas de controle é diminuir a complexidade dos painéis, onde se tenha preferencialmente uma hierarquização de informações, sendo que consoles interativos fornecem informação de forma mais conveniente para que fique adequada a cada situação particular. Desta forma surgiram vários tipos de sistemas de monitoração dedicados a funções específicas, tais como os sistemas de monitoração e análise de vibração, monitoração de partes soltas e monitoração de fadiga de materiais. Esses sistemas são chamados de Sistemas de Suporte ao Operador (Operator Support System – OSS) e têm como finalidade facilitar as ações do operador, cuja função principal passou a ser de supervisor e antecipador de situações indesejáveis.

Sistemas de suporte ao operador fornecem informação mais processada e integrada do que aquela disponível da instrumentação convencional. Embora eles não sejam necessários para a operação ou segurança da usina, os sistemas de apoio ao operador fornecem informação de alto nível. Eles auxiliam e aconselham os operadores e permitem que eles tomem decisões estratégicas melhores durante ambas as condições de operação

normal e anormal. Eles também fornecem uma capacidade de gerenciamento de supervisão durante condições de emergência.

Além dos sistemas já mencionados, existem vários tipos de sistemas de suporte ao operador. Dentre eles pode-se citar o gerenciamento inteligente de alarme, que supera o problema causado pela inundação de alarmes durante transtornos na usina. É implementado pela redução lógica e o mascaramento de alarmes irrelevantes, pela mostra do estado de alarmes de subsistemas ou grupos funcionais da usina e pela priorização dinâmica baseada no estado da usina. Outro tipo de sistema de suporte ao operador consiste na apresentação computadorizada dos procedimentos operacionais. Esta função complementa os procedimentos operacionais e emergenciais escritos, dando suporte computadorizado ao operador, guiando-o para o procedimento relevante e acompanhando as ações de monitoração requeridas nos procedimentos.

Outro importante sistema de suporte ao operador é o sistema de detecção de falhas e diagnóstico. Esse sistema alerta os operadores para problemas de falhas em sensores e atuadores, e auxilia no diagnóstico antes que os limites normais de alarmes sejam atingidos. As tarefas do sistema de detecção de falhas e diagnóstico podem englobar desde a simples supervisão das variáveis, verificando se os seus valores estão dentro de um limite preestabelecido, até a detecção de uma anomalia no processo (detecção de falha). Sistemas de monitoração e diagnóstico mais sofisticados podem ainda realizar a identificação do componente responsável pela irregularidade observada no sistema (identificação de falhas). Em último caso, e desde que isso não comprometa o desempenho do processo, o sistema pode ainda gerar um sinal que irá substituir o sinal do sensor ou atuador falho, de forma que o processo possa continuar em andamento até a próxima manutenção.

Em sistemas de monitoração e diagnóstico tradicionais utiliza-se a chamada redundância física (ou redundância por hardware), onde dois ou mais sensores similares realizam a mesma medida. Um esquema de votação lógica pode então ser utilizado para identificar um instrumento falho. Embora este seja um método confiável, há uma série de desvantagens, tais como o custo elevado de instalar e manter um maior número de sensores. Além disso, nem sempre há disponibilidade de espaço para a instalação de sensores redundantes.

Além da redundância física (ou por hardware) tem-se a chamada redundância analítica (ou redundância por software) que faz uso da estimativa de sinais gerados por um modelo matemático do sistema considerado. Este modelo matemático pode ser elaborado a

partir das equações que descrevem o processo, chamadas equações paramétricas ("*first principle model*") ou o modelo é gerado a partir dos dados, a partir de equações não-paramétricas ("*data-driven model*") [15]. Estas estimativas são comparadas com as medidas dos sensores do sistema. Devido aos recentes avanços na computação, tem crescido muito o número de sistemas de monitoração baseados nesse novo conceito. A principal vantagem do emprego de redundância analítica é que não há a necessidade de acrescentar novos componentes ao sistema existente para implementar o algoritmo de monitoração e detecção de falhas. Normalmente, a instrumentação existente para controlar o processo e o sistema de aquisição de dados são suficientes para isso.

Mesmo em sistemas que já possuem redundância física, o acréscimo de um sistema de monitoração e diagnóstico baseado em "data driven modeling" pode aumentar significativamente a confiabilidade do sistema, reduzindo riscos de acidentes. Além disso, outra consequência esperada é a redução da necessidade de manutenções, reparos e calibração da instrumentação, aumentando a disponibilidade da instalação.

A presente tese apresenta uma metodologia de monitoração e detecção de falhas utilizando o conceito de redundância analítica, onde o modelo utilizado é baseado na metodologia GMDH (Group Method of Data Handling) [15]. O sistema proposto faz a monitoração, comparando os valores gerados pelo modelo analítico com os valores medidos. O sistema faz ainda o diagnóstico, identificando a falha, utilizando para isso uma série de regras SE ENTÃO (*if then*) que caracterizam a falha.

2 OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é demonstrar a viabilidade de uso da metodologia GMDH (Group Method of Data Handling) na monitoração de sensores e atuadores em sistemas de processo e o uso da metodologia de Lógica Nebulosa na detecção de falhas. Para isso foi desenvolvido um Sistema de Monitoração e Diagnóstico para Detecção de Falhas, utilizando a metodologia GMDH e Lógica Nebulosa.

O sistema proposto faz a monitoração, comparando os valores gerados pelo modelo analítico GMDH com os valores medidos. O sistema faz ainda a identificação da falha, utilizando para isso um sistema de diagnóstico composto por uma série de regras SE ENTÃO (*if then*) que caracterizam a falha.

O modelo analítico do sistema de processo a ser monitorado é construído a partir das relações entre os diferentes componentes do sistema (*data-driven model*). Uma anomalia é detectada quando a diferença entre os valores lidos e os valores estimados pelo modelo analítico (valores dos resíduos) atingem um valor acima de um limite preestabelecido.

Para fornecer o diagnóstico e detecção das falhas foi desenvolvido um sistema composto por uma série de regras SE ENTÃO (*if then rules*) que identificam o tipo de falha ocorrida. As regras são desenvolvidas a partir dos resultados de simulações de falhas do sistema. Para tornar o conjunto de regras mais abrangente, foi utilizada a lógica nebulosa (Fuzzy Logic).

Para o desenvolvimento da metodologia foram utilizados inicialmente dados gerados por modelos teóricos de sistemas termodinâmicos, para depois utilizar dados de operação de um sistema real. O modelo teórico inicial proposto é um trocador de calor, escolhido por ser um sistema termodinâmico simples, onde as equações que relacionam as variáveis do sistema podem ser obtidas analiticamente. Esse modelo foi utilizado para estudos exaustivos da metodologia. A seguir a metodologia é aplicada a um modelo teórico do reator de pesquisas do Ipen IEA-R1. O modelo desenvolvido permite gerar dados para diferentes condições de operação normal, além de dados com falhas. A metodologia é então aplicada aos dados de operação do reator de pesquisas do Ipen IEA-R1.

O Reator IEA-R1 é um reator tipo piscina, refrigerado e moderado a água leve, usando berílio como refletor. Como base de dados utilizam-se os valores do Sistema de Aquisição e Dados (SAD) do reator, composto de 57 variáveis operacionais, incluindo temperatura, vazão, nível, pressão, radiação, potência nuclear e posição de barras. A função de monitoração é independente das indicações dos painéis de Instrumentação e Controle instalados na Sala de Controle, e portanto a instalação do Sistema de Monitoração e Detecção de Falhas não interfere na operação do reator.

2.1 Aspectos relevantes e contribuições do trabalho

As principais contribuições deste trabalho são:

- Proposta inédita de aplicação da metodologia GMDH na monitoração e detecção de falhas de dados de operação, demonstrada através do desenvolvimento de um Sistema de Monitoração e Detecção de Falhas aplicado ao reator de pesquisas do Ipen IEA-R1.
- Criação de um banco de dados das variáveis operacionais do reator de pesquisas do Ipen, que pode ser utilizado como histórico para estudos futuros.
- Criação de um modelo teórico do reator de pesquisas do Ipen utilizando uma interface gráfica que permite a geração de dados em diferentes condições de operação estabelecidas pelo usuário de forma fácil e amigável.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A história do desenvolvimento da metodologia GMDH começa em 1968 [29] [31] e pode ser seguida através dos artigos do periódico *Avtomatika* [30] [32], publicado pelo Instituto de Cibernética da Academia de Ciências da Ucrânia SSR. Vários exemplares contêm publicações relacionadas aos problemas GMDH. Em 1969, foi publicado um livro em russo [28] com um apêndice dedicado ao novo método. Foi a primeira publicação sobre GMDH.

As revistas *Avtomatika* foram traduzidas e publicadas nos Estados Unidos e artigos adicionais [26] [27] foram publicados em inglês em outras revistas.

Um dos primeiros estudos sobre GMDH foi a dissertação de Shankar [46] que comparou GMDH com análise de regressão para precisão de modelagem com número de dados limitado. Mais tarde, outros algoritmos do tipo GMDH foram publicados por autores japoneses [22] [35] [45] [49] e pelo cientista polonês Maciejowsky [36]. A conclusão de [36] foi que GMDH é a melhor estratégia para solução de identificação e problemas de estimativa para curto alcance (short-range). Yu P. Yarachkovsky e Yvakhnenko [33][58] [59] [60] compararam a teoria matemática do GMDH e mostraram que regressão estatística é um caso particular de algoritmo GMDH.

Os sistemas de Monitoração e Detecção de Falhas atuais são o resultado da utilização de várias técnicas combinadas. Avanços nas modelagens matemáticas e teorias modernas de controle, bem como as aplicações de computadores on-line, permitem que as estimativas de estados do processo e identificação de parâmetros sejam implementados em tempo real. Estas facilidades têm levado ao desenvolvimento de uma grande variedade de sistemas de detecção e identificação de falhas [47]. Bisseur, Martin e Morris [5] mesclam técnicas de redes neurais e estatísticas no seu modelo de monitoração do desempenho do processo de fabricação de papel. Altug, Chow e Trussel [3] também utilizaram lógica nebulosa e redes neurais em seu sistema de monitoração e detecção de falhas em motores.

Atualmente, o Departamento de Engenharia Nuclear da Universidade do Tennessee, juntamente com o Centro de Manutenção e Confiabilidade (Maintenance and Reliability Center) são importantes aglutinadores de desenvolvimento de tecnologia na área de Monitoração e Detecção de Falhas. O Dr. Belle R. Upadhyaya desenvolve as

seguintes linhas de pesquisa na área: diagnóstico automatizado de válvulas moto-operadas [48], predição de vida de componentes de usinas [54], sistema automático para análise de dados de teste de Eddy Current para identificação de defeitos em tubos de Geradores de Vapor [55], validação de sensores e detecção de falhas [14], envelhecimento e prognóstico de sensores de temperatura industriais [53], análise de sinais de multi-resolução pela integração das técnicas de Wavelet e STFT [12] e diagnóstico de falhas em motores e tecnologia inteligente de manutenção [50].

A próxima geração de reatores nucleares começa a surgir com uma tentativa de um consórcio mundial no desenvolvimento de um novo conceito de reator nuclear. O reator IRIS (International Reactor Innovative & Secure) é um deles, sendo um reator de água leve de nova geração que contempla os requisitos de sustentabilidade, segurança, confiabilidade e economia dos reatores de IV geração [1] [8]. O núcleo do reator IRIS é caracterizado por um modo de operação onde a queima é contínua, sem rearranjo (shuffling) ou troca parcial de combustível. Normalmente, o tempo de parada para troca e carregamento de combustível é utilizado para fazer a manutenção. É portanto visível que a maior vantagem em termos de fator de capacidade de quatro anos de intervalo de troca de combustível pode ser obtida apenas se este tempo coincidir com o tempo de intervalo de manutenção. Devido a este fato, uma das mais inovativas características do IRIS é a manutenção otimizada, onde o intervalo entre paradas para manutenção se estende para 48 meses. Por esse motivo, esforços estão sendo focalizados em diagnósticos avançados on-line para o reator cujos componentes do primário são integrados em um único vaso de pressão. Um deles é o projeto *A New Paradigm for Automatic Development of Highly Reliable Control Architectures for Nuclear Power Plants* do qual participam o departamento de Engenharia Nuclear da Universidade do Tennessee, o Laboratório Nacional de Oak Ridge (ORNL,) e a Universidade Estadual da Carolina do Norte (NCSU) [38]. Um dos tópicos desse projeto é o desenvolvimento de sistemas de monitoração e diagnóstico que utilizem técnicas avançadas. Estes incluem a detecção de falhas incipientes [16] e detecção de falhas múltiplas [52]. Nestes trabalhos, foi desenvolvido um sistema de monitoração e detecção de falhas para um circuito termo-hidráulico experimental de baixa pressão. Falhas simples e múltiplas foram impostas ao circuito experimental, testando o desempenho do sistema de monitoração desenvolvido. Ainda nessa linha de pesquisa de monitoração e detecção de falhas, K. Zhao e Baofu Lu e Upadhyaya [56] reuniram técnicas de GMDH, PCA (Principal Component Analysis) e ANFIS (Adaptive Network-based Fuzzy Inference System) para desenvolver um sistema de monitoração e detecção de falhas

incipientes. Para ilustrar o desempenho do sistema desenvolvido foi utilizado um modelo teórico de gerador de vapor de um PWR. Mais recentemente, tem-se a aplicação de GMDH na estimativa da taxa de dose do reator de pesquisas do Ipen IEA-R1 [20].

O Grupo de Monitoração e Diagnóstico do Centro de Engenharia Nuclear do Ipen tem participado ativamente desses trabalhos, através de projetos de cooperação técnica com o Departamento de Engenharia Nuclear da Universidade do Tennessee. Projetos patrocinados pela Agência Internacional de Energia Atômica, Nuclear Science Foundation e CNPq [11] [44], incluíram estágios de pesquisadores do grupo no Departamento de Engenharia Nuclear da Universidade do Tennessee, visitas técnicas de pesquisadores do Ipen e de pesquisadores da Universidade do Tennessee. Desses intercâmbios surgiram vários trabalhos na área de monitoração e diagnóstico, incluindo teses de mestrado e doutorado [9] [39] [42] além de várias publicações em congressos e periódicos [10] [19] [40] [43] [51].

4 METODOLOGIA GMDH

A metodologia GMDH (Group Method of Data Handling) consiste em um algoritmo proposto por Ivakhnenko como um método algébrico para estimar estados de um sistema, saídas de controladores e funções de atuadores [15]. A metodologia pode ser considerada como um algoritmo auto-organizável de propagação indutiva para a solução de problemas práticos mais complexos. O método soluciona o problema de se obter um modelo matemático do objeto, a partir de observações de amostras de dados. O modelo obtido é utilizado para identificação e reconhecimento de padrões, ou descrever um processo, o qual tem lugar o objeto no futuro, ou seja, estimativa das variáveis de um processo.

O método GMDH soluciona o problema multidimensional de otimização do modelo pelo procedimento de escolha e seleção de modelos escolhidos a partir de um conjunto de modelos candidatos de acordo com um critério dado. A maioria dos algoritmos GMDH usa funções de referência polinomiais. Uma conexão genérica entre variáveis de entrada e de saída pode ser expressa pela série funcional de Volterra, discreta análoga do polinômio de Kolmogorov-Gabor:

$$y = a + \sum_{i=1}^m b_i x_i + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m c_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^m d_{ijk} x_i x_j x_k + \dots \quad (1)$$

onde $\{x_1, x_2, x_3 \dots\}$ são as variáveis de entrada e $\{a, b, c, \dots\}$ são os coeficientes do polinômio.

Componentes da matriz de entrada podem ser variáveis independentes, formas funcionais ou termos de diferenças finitas. Outras funções de referência não lineares também podem ser usadas. O método permite encontrar simultaneamente a estrutura do modelo e a dependência da saída do sistema modelado em função dos valores de entrada mais significativos do sistema.

A teoria GMDH soluciona problemas em várias áreas dentre as quais pode-se destacar [18]:

- estimativa de processos e eventos a curto e longo prazo;
- aproximação de processos multivariados;
- "clusterização" de amostras de dados;
- reconhecimento de padrões no caso de variáveis contínuas e discretas;
- diagnóstico através de algoritmos probabilísticos de escolha e seleção;
- suporte na decisão após um cenário de regras do tipo "se-então".

Aksenova e Yurachkovsky [2] obtiveram as bases teóricas da efetividade do GMDH como método adequado e robusto de construção de modelos para estimativa. A modelagem auto-organizável é baseada em redes de aprendizado estatísticas, as quais são redes de funções matemáticas que capturam relações complexas não lineares em uma forma de execução rápida e compacta. Tais redes subdividem o problema em partes menores de fácil manuseio e então automaticamente aplicam técnicas de regressão avançadas para resolver cada um desses problemas simples.

4.1 Descrição da metodologia GMDH

Em geral, os dados disponíveis são as variáveis de entrada e de saída de um sistema, representadas pela matriz de variáveis de entrada $X = (x_{ij})$, e pelo vetor da variável de saída $Y = (y_i)$, $i = 1, 2, \dots, n$ e $j = 1, 2, \dots, m$ onde n é o número total de observações e m é o número total de variáveis.

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & \dots & x_{1m} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & \dots & x_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & x_{ij} & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{n1} & x_{n2} & \dots & \dots & x_{nm} \end{bmatrix} \quad Y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \dots \\ y_i \\ \dots \\ y_n \end{bmatrix} \quad (2)$$

O algoritmo GMDH é executado de acordo com os seguintes passos:

1º passo. O primeiro passo consiste em construir um novo conjunto de variáveis Z . Para tanto, inicialmente deve-se dividir as observações em dois subconjuntos

distintos. O primeiro subconjunto será utilizado para ajuste ($i=1$ a nt) e o segundo para verificação ($i=nt+1$ até n).

$$X = \begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} & \cdots & \cdots & X_{1m} \\ X_{21} & X_{22} & \cdots & \cdots & X_{2m} \\ \cdots & \cdots & \cdots & X_{ij} & \cdots \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ X_{nt1} & X_{nt2} & \cdots & X_{ntj} & \cdots \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ X_{n1} & X_{n2} & \cdots & \cdots & X_{nm} \end{bmatrix} \quad Y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \cdots \\ y_{nt} \\ \cdots \\ y_n \end{bmatrix} \quad (3)$$

A seguir tomam-se as variáveis independentes do subconjunto de ajuste duas de cada vez para todas as combinações possíveis e calcula-se os coeficientes da seguinte regressão polinomial, onde p e q são as colunas da matriz X :

$$y_i = a_{pq} + b_{pq} x_{ip} + c_{pq} x_{iq} + d_{pq} x_{ip}^2 + e_{pq} x_{iq}^2 + f_{pq} x_{ip} x_{iq} \quad \begin{cases} p = 1, 2 \dots m, p \neq q, \\ q = 1, 2 \dots m, q > p, \\ i = 1, 2 \dots nt \end{cases} \quad (4)$$

Para cada combinação das variáveis independentes (colunas de X) há um conjunto de coeficientes da regressão, resultando na matriz de coeficientes C . Como se tem $m(m-1)/2$ diferentes combinações das variáveis de entrada, resultam $m(m-1)/2$ linhas da matriz de coeficientes C .

$$C = (a_{pq}, b_{pq}, c_{pq}, d_{pq}, e_{pq}, f_{pq}) \quad \begin{cases} p = 1, 2 \dots m, p \neq q, \\ q = 1, 2 \dots m, p > q \end{cases} \quad (5)$$

Para cada conjunto de coeficientes C_{pq} , avalia-se o polinômio para todos os n pontos de dados para calcular uma nova estimativa de y , chamada z_{pq} :

$$z_{i,pq} = a_{pq} + b_{pq} x_{ip} + c_{pq} x_{iq} + d_{pq} x_{ip}^2 + e_{pq} x_{iq}^2 + f_{pq} x_{ip} x_{iq} \quad (6)$$

Esses novos valores são armazenados na primeira coluna de uma matriz Z .

Repete-se esta avaliação para todos os conjuntos de coeficientes e para todos os n dados, gerando uma nova matriz Z chamada nova geração de variáveis.

$$Z = (z_{ij}) \begin{cases} i = 1, 2, \dots, n, \\ j = 1, 2, \dots, m(m-1)/2 \end{cases} \text{ onde cada } j \text{ corresponde a um par } p, q \quad (7)$$

$$Z = \begin{bmatrix} z_{11} & z_{12} & \dots & \dots & z_{1, m(m-1)/2} \\ z_{21} & z_{22} & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & z_{ij} & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ z_{n1} & z_{n2} & \dots & \dots & z_{n, m(m-1)/2} \end{bmatrix} \quad (8)$$

Pode-se interpretar estas variáveis (matriz Z) como novas variáveis que têm melhor poder de estimativa do que aquelas da geração original (matriz X).

2º passo. O próximo passo é comparar cada coluna de Z com a variável dependente Y . Isto é, para cada coluna j de Z calcula-se o desvio médio quadrático r_j para i variando de $nt+1$ até n , ou seja, utilizando o subconjunto de verificação:

$$r_j^2 = \frac{\sum_{i=nt+1}^n (y_i - z_{ij})^2}{\sum_{i=nt+1}^n y_i^2} \quad j=1, 2, \dots, m(m-1)/2 \quad (9)$$

Ordena-se as colunas de Z em ordem crescente de r_j e então seleciona-se aquelas colunas de Z que satisfaçam um critério selecionado anteriormente (por exemplo $r_j < R$, onde R é um valor residual mínimo). Pode-se notar que o número de variáveis salvas, digamos m_1 , pode ser igual, menor ou maior do que o número original m .

3º passo. Esta nova matriz Z irá substituir a matriz original X . Estas novas variáveis são combinadas exatamente como se fez anteriormente. Ou seja, calculam-se todas as equações de regressão quadráticas de y em função destas novas variáveis (duas a duas). Isso irá fornecer um novo conjunto de $m_1(m_1-1)/2$ equações de regressão para estimar y a partir das novas variáveis. Agora são selecionadas as melhores das novas estimativas, gerando novas variáveis independentes a partir das equações selecionadas para substituir as anteriores, e combinar todos os pares destas novas variáveis.

4º passo. Do passo anterior encontra-se o menor r_j e chama-se de RMIN. Se o valor de RMIN é menor que o valor de RMIN da geração prévia, repete-se os passos 1, 2 e 3. Se o valor de RMIN é maior que o valor precedente, assume-se que a "curva RMIN" atingiu seu mínimo, o processo é interrompido e usam-se os resultados da geração anterior (Figura 1).

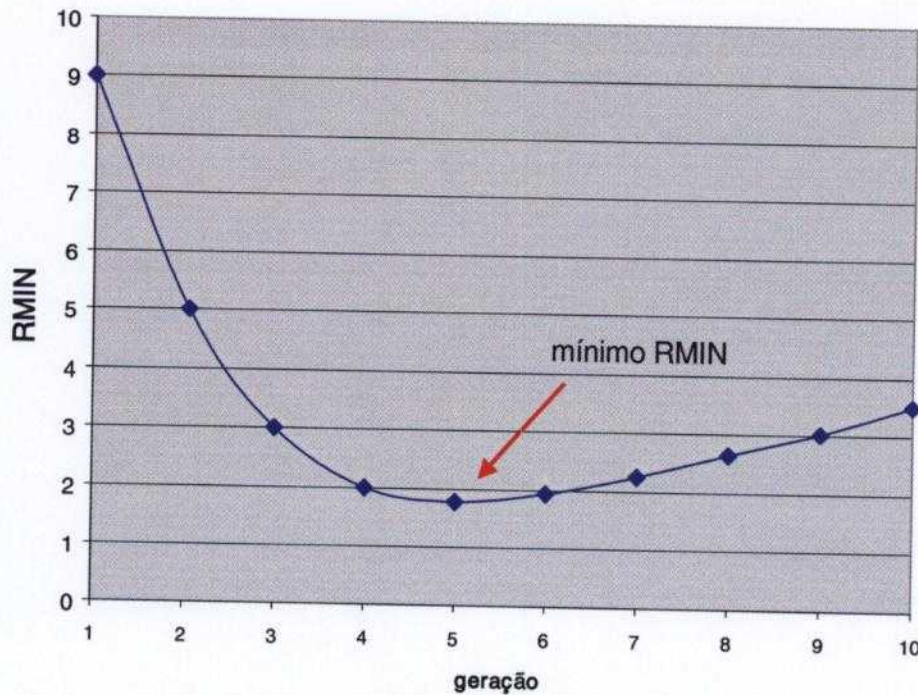


FIGURA 1. Curva RMIN calculado a cada geração.

A primeira coluna da matriz Z conterá os valores de y_i do polinômio de Ivakhnenko avaliados para os n pontos de dados originais. Em outras palavras, a primeira coluna de Z é a estimativa da variável dependente. Para encontrar os coeficientes a , b_i , c_{ij} , d_{ijk}, \dots no polinômio de Ivakhnenko, deve-se salvar todos os conjuntos de coeficientes de todas as gerações que foram computados a cada iteração e sistematicamente avaliar esta árvore de quadráticos até chegar em um polinômio de alta ordem nas variáveis originais x_1, x_2, \dots, x_m . De um ponto de vista computacional, desde que se tenham todos os polinômios de regressão quadráticos armazenados no computador, é possível computar a estimativa da saída y a partir destes quadráticos.

Na Figura 2 tem-se uma ilustração mostrando que os valores estimados são propagados sucessivamente para gerações superiores do algoritmo, melhorando a cada estágio sucessivo. A cada estágio de aproximação z_{ipq} é formado a partir de pares dos

sinais de entrada (desta geração), e novos valores da variável estimada são propagados para a próxima geração. A iteração continua até que o desvio médio quadrático entre os valores estimados e medidos para determinada variável de saída seja menor do que um valor desejado, ou quando um número máximo de gerações previamente definido seja atingido.

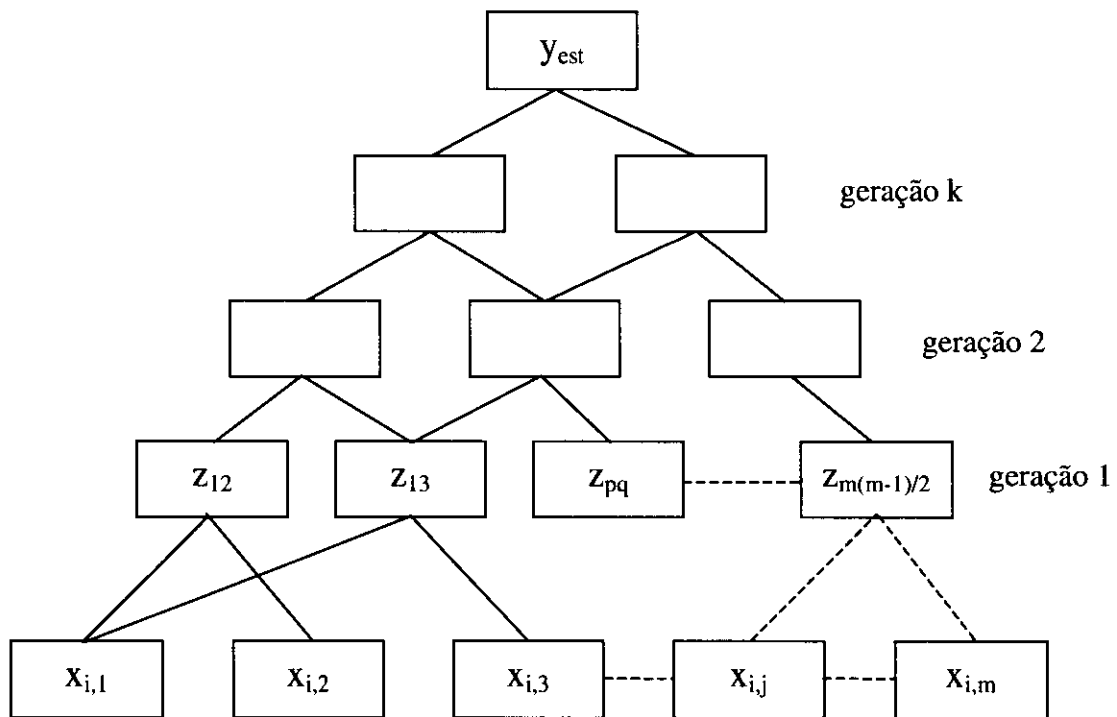


FIGURA 2. Estrutura do modelo auto-organizável GMDH com m entradas e k gerações.

O que se tem é uma estimativa de y como uma forma quadrática de duas variáveis, as quais são por sua vez uma combinação quadrática de duas mais variáveis, as quais são também combinações de duas outras variáveis, ... as quais são combinações quadráticas das variáveis originais. Em outras palavras, se forem feitas as substituições algébricas necessárias, o polinômio resultante teria a forma mostrada na equação a seguir:

$$y = a + \sum_{i=1}^m b_i x_i + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m c_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^m d_{ijk} x_i x_j x_k + \dots \quad (10)$$

conhecido como o polinômio de Ivakhnenko [15].

4.2 Variações da metodologia GMDH

Há muitas variações do algoritmo básico GMDH [15]. O algoritmo GMDH é o que se pode chamar de um método heurístico, e portanto pode-se mudar vários passos específicos para chegar em algoritmos modificados. A mudança dos polinômios quadráticos para diferentes tipos de funções e o uso de diferentes regras de decisão ao invés do critério de regularização r_j para selecionar as descrições parciais a cada nível são apenas duas variações mais comuns. Essas duas variações são mostradas a seguir.

4.2.1 Uso de funções racionais

O conjunto de funções quadráticas da equação (6) geralmente é suficiente para representar a grande maioria das relações entre as variáveis de entrada e saída de um sistema. Porém, quando as relações são da forma de funções racionais, a regressão polinomial pode não ser a mais adequada [16]. Ao invés de aumentar a ordem da regressão polinomial, a formulação da equação (6) pode ser generalizada para incluir funções racionais ou outras funções não lineares. Um exemplo de funções racionais utilizado em [20] é dado pela equação (11) a seguir:

$$\begin{aligned}
 y_i = & a_{pq} + b_{pq} x_{ip} + c_{pq} x_{iq} + d_{pq} x_{ip}^2 + e_{pq} x_{iq}^2 + f_{pq} x_{ip} x_{iq} + g_{pq} \frac{1}{x_{ip}} + h_{pq} \frac{1}{x_{iq}} + \\
 & i_{pq} \frac{1}{x_{ip}^2} + j_{pq} \frac{1}{x_{iq}^2} + k_{pq} \frac{1}{x_{ip} + x_{iq}} + l_{pq} \frac{1}{x_{ip} \cdot x_{iq}} + m_{pq} \frac{x_{ip}}{x_{iq}} + n_{pq} \frac{x_{iq}}{x_{ip}} + \\
 & o_{pq} \frac{x_{ip}}{x_{ip} + x_{iq}} + p_{pq} \frac{x_{iq}}{x_{ip} + x_{iq}} + q_{pq} \frac{x_{ip} + x_{iq}}{x_{ip}} + r_{pq} \frac{x_{ip} + x_{iq}}{x_{iq}} + \\
 & s_{pq} \cdot \sin \cdot (x_{ip}) + t_{pq} \cdot \sin \cdot (x_{iq}) + u_{pq} \cdot \cos \cdot (x_{ip}) + v_{pq} \cdot \cos \cdot (x_{iq}) \quad (11)
 \end{aligned}$$

4.2.2 Critério de seleção do modelo

O algoritmo GMDH descrito na seção 4.1 usa o critério de regularização para selecionar modelos a cada iteração. A desvantagem deste critério é que ele não é um bom seletor na presença de dados ruidosos e no problema de estimativas de médio e longo alcance. Por essas razões serão descritos dois outros seletores usados por Ivakhnenko: o critério *unbiased* e o critério combinado [15].

A. O critério *unbiased* (constrói modelos insensíveis ao ruído)

O critério *unbiased* (algumas vezes chamado critério de mínima tendência) requer que o modelo selecionado seja insensível ao ruído dos dados a partir dos quais ele

foi construído. O conjunto de dados é subdividido em duas partes: A e B. A partir das observações A são construídos os $m(m-1)/2$ modelos regressivos da forma usual para todos os pares de variáveis independentes x_i e x_j como feito anteriormente. Avalia-se cada modelo para todos os n dados e estes números avaliados são então armazenados nas colunas de Z_A . Faz-se o mesmo para as observações em B. Isto resulta em duas matrizes Z_A e Z_B , das quais pode-se calcular o valor de u_j , dado pela equação (12), o qual é conhecido como critério *unbiased*:

$$u_j^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (z_{ij}^A - z_{ij}^B)^2}{\sum_{i=1}^n y_i^2} \quad j=1, 2, \dots, m \quad (12)$$

A seguir ordenam-se os valores computados de u_j em ordem crescente e selecionam-se aquelas variáveis que satisfazem $u_j < U$ (U é uma constante predefinida). Chamando UMIN o menor valor de u_j , as iterações param quando a curva de UMIN atingir seu mínimo (como foi feito na curva RMIN). O critério *unbiased* é útil para estimativas de curto alcance como nos casos nos quais as observações são séries temporais e sucessivas observações representam consecutivos pontos no tempo. Porém, o critério *unbiased* não tem um poder de estimativa da variável tão bom quanto o critério de regularização. Por esta razão foi desenvolvido o critério combinado.

B. O critério combinado (combinação do critério de regularização e *unbiased*)

O critério de regularização r_j seleciona modelos que têm boas propriedades de predição mas podem ser sensíveis a dados ruidosos, enquanto que o critério *unbiased* u_j é insensível ao ruído mas pode não ter boas propriedades de predição. Por esta razão o melhor critério combina estas duas idéias em um único critério.

O cálculo desse critério é efetuado da seguinte maneira: as observações são subdivididas em 3 subconjuntos: A, B e C, geralmente 40%, 40% e 20% dos dados em cada um dos subconjuntos. São construídas as matrizes Z_A e Z_B da mesma forma que foi feito anteriormente e também é construída a matriz Z , usando as observações combinadas de A e B. C é o conjunto de verificação. Com esses arranjos são calculados o critério de regularização r_j e o critério *unbiased* u_j como foi feito anteriormente, mas agora calcula-se o critério combinado c_j dado por:

$$c_j = (r_j^2 + u_j^2)^{1/2} \quad j=1, 2, \dots, m \quad (13)$$

Ordena-se os valores de c_j em ordem crescente e tomam-se aqueles modelos que satisfazem $c_j < D$ (D é um número predefinido). Chamando CMIN o menor dos c_j , a iteração é interrompida quando a curva de CMIN atingir seu mínimo (como foi feito nas curvas RMIN e UMIN). Este critério irá selecionar modelos que têm boas propriedades de predição e também insensível ao ruído.

4.3 Comparação entre GMDH e Redes Neurais

Resultados obtidos por redes estatísticas de aprendizado e especialmente por algoritmos GMDH podem ser comparados com resultados obtidos por redes neurais. O objetivo desta comparação não é determinar qual das metodologias é a melhor, mas sim apenas ressaltar algumas características da metodologia GMDH que não é tão conhecida como atualmente é a metodologia de Redes Neurais.

Em redes neurais o usuário deve estimar a estrutura inicial escolhendo o número de camadas, número de neurônios na camada oculta e o tipo de função transferência da rede neural. Ou seja, o usuário estabelece uma arquitetura inicial para a rede baseado em conhecimentos próprios. Os cálculos são então efetuados com a finalidade de treinar a rede neural para que os parâmetros necessários sejam determinados de acordo com critérios preestabelecidos. O desempenho da rede é avaliado utilizando-se dados diferentes daqueles utilizados para o treinamento. O usuário então pode, de acordo com os resultados obtidos, fazer novos arranjos de arquitetura, como por exemplo aumentar o número de neurônios da camada oculta, e repetir todo o procedimento anterior para esta nova arquitetura. A arquitetura definitiva será escolhida dentre aquelas que forneceram melhores resultados.

Os problemas bem conhecidos de uma escolha ótima da arquitetura da rede neural ser subjetiva são solucionados nos algoritmos GMDH, visto que nestes a escolha da arquitetura é objetiva. Como visto na descrição da metodologia GMDH, os modelos são selecionados automaticamente, de forma que a arquitetura final é definida pela seqüência auto-organizável de modelos parciais a cada nova geração de iteração.

Um outro aspecto refere-se à escolha das variáveis que serão utilizadas como variáveis de entrada do modelo. Enquanto que na metodologia de redes neurais o usuário deve escolher estas variáveis, na metodologia GMDH as variáveis ou combinações de variáveis que pouco influenciam na descrição do modelo vão sendo descartadas automaticamente ao longo do cálculo das equações parciais em cada iteração. Em outras palavras, o método seleciona automaticamente quais serão as variáveis utilizadas no modelo final estabelecido, o que se constitui em uma vantagem, particularmente em casos de sistemas complexos. Sabe-se que o tratamento da colinearidade dos dados de entrada para redes neurais é uma etapa crítica para obter convergência e sucesso no treinamento da rede.

A Tabela 1 a seguir fornece uma comparação entre as metodologias de redes neurais e GMDH em relação às suas aplicações na análise de dados [18].

TABELA 1. Comparação entre Redes Neurais e GMDH.

	Redes Neurais	GMDH
arquitetura	estrutura de rede pré-selecionada, estrutura da rede fixa	estrutura da rede evolui durante o processo de estimativa
auto-organização	dedutiva, escolha subjetiva do número de camadas e do número de nós	indutiva, número de camadas e nós estimado pelo mínimo de um critério externo, escolha objetiva
otimização, convergência	convergência global é difícil de garantir	modelo de ótima complexidade é encontrado
tempo de computação	seleção da arquitetura mais adequada é feita de forma experimental por tentativa e erro e portanto demanda tempo e experiência	simultaneamente otimiza a estrutura e dependências no modelo, não é uma técnica consumidora de tempo
escolha das variáveis de entrada	escolha das variáveis definida pelo usuário	variáveis não apropriadas são excluídas automaticamente

5 SISTEMA DE MONITORAÇÃO E DIAGNÓSTICO

O Sistema de Monitoração e Diagnóstico utiliza o conceito de redundância analítica, onde o modelo analítico é desenvolvido utilizando-se a metodologia GMDH. O sistema faz a monitoração, comparando os valores das variáveis gerados pelo modelo analítico com os valores lidos das variáveis. O sistema faz ainda a identificação da falha, utilizando para isso um sistema de diagnóstico composto por uma série de regras que caracterizam a falha.

O Sistema de Monitoração e Diagnóstico é um sistema de suporte ao operador, e fornece informações adicionais à instrumentação convencional, dando subsídios ao operador em condições anormais, mas que ainda não tenham atingido uma condição de alarme ou desligamento da instalação.

O Sistema de Monitoração e Diagnóstico utiliza os sinais da instrumentação existente e é conectado de forma a não influenciar o funcionamento de outros sistemas de suporte ou sistemas de proteção (Figura 3).

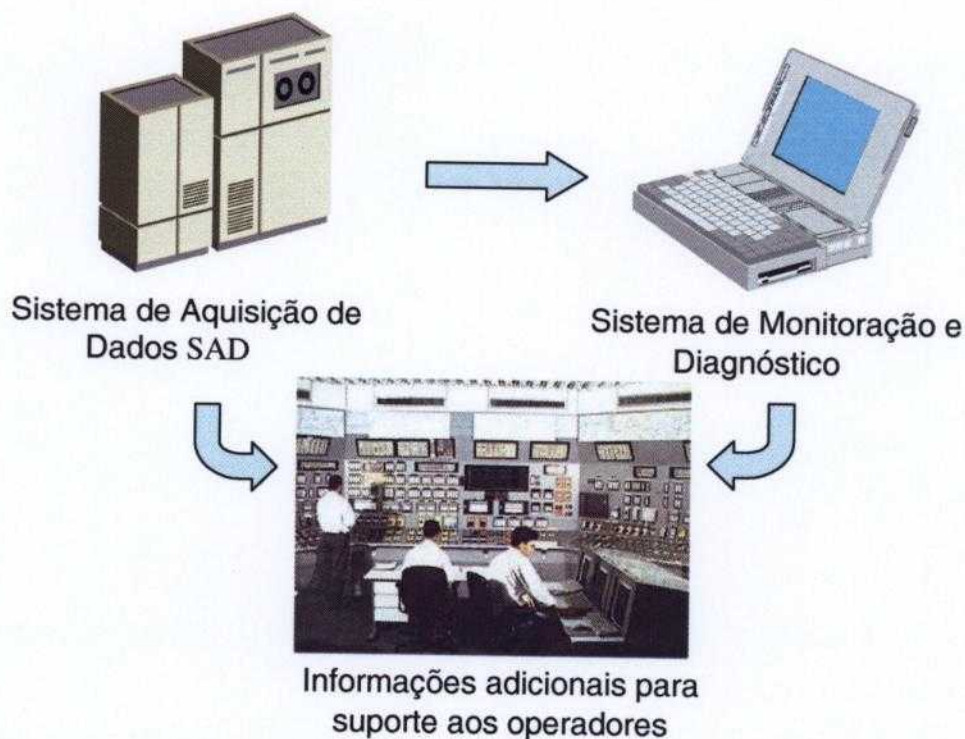


FIGURA 3. Sistema de monitoração e diagnóstico.

5.1 Implementação do sistema de monitoração e diagnóstico

A implementação do sistema de monitoração e diagnóstico é dividida em três etapas. A primeira etapa consiste na determinação do modelo GMDH, a segunda etapa consiste na monitoração propriamente dita, onde os resultados do modelo GMDH são utilizados para fazer a estimativa da variável que será monitorada e a terceira etapa consiste no diagnóstico através da detecção e identificação da falha.

O modelo GMDH consiste num conjunto de equações que descrevem o sistema. Os coeficientes das equações são determinados a partir de aproximações sucessivas, onde as estimativas das variáveis são propagadas para gerações superiores.

A estrutura do modelo GMDH contém os coeficientes das equações calculados para todas as combinações de variáveis de entrada de cada geração, assim como a respectiva ordenação das colunas que foram efetuadas em cada geração para atingir o valor final da melhor estimativa do modelo (ver item 4.1).

Nas Figuras 4, 5 e 6 tem-se diagramas esquemáticos onde são mostradas as etapas de implementação do sistema de monitoração e diagnóstico.

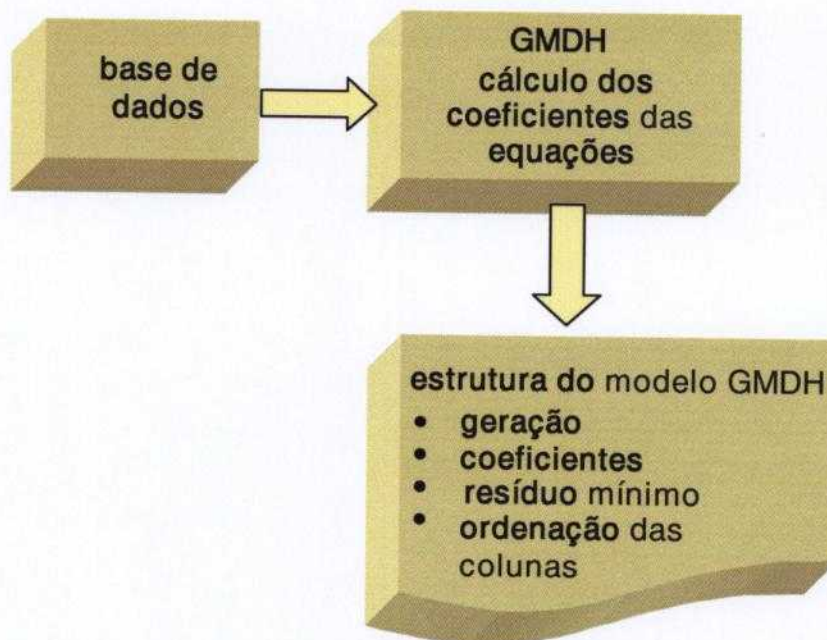


FIGURA 4. Primeira etapa da implementação do sistema de monitoração e diagnóstico: Determinação do modelo GMDH.

A segunda etapa de implementação do sistema de monitoração e diagnóstico consiste em utilizar o resultado do modelo GMDH desenvolvido. A monitoração é baseada no conceito de redundância analítica, onde o valor redundante é o valor calculado empregando-se a metodologia GMDH.

A monitoração utiliza o cálculo do resíduo. O resíduo é a diferença entre o valor lido e o valor estimado pelo modelo analítico. Em condições normais de operação, cada resíduo individual deve ser próximo de zero, indicando uma boa concordância entre a condição estimada pelas equações GMDH e a sua condição real.

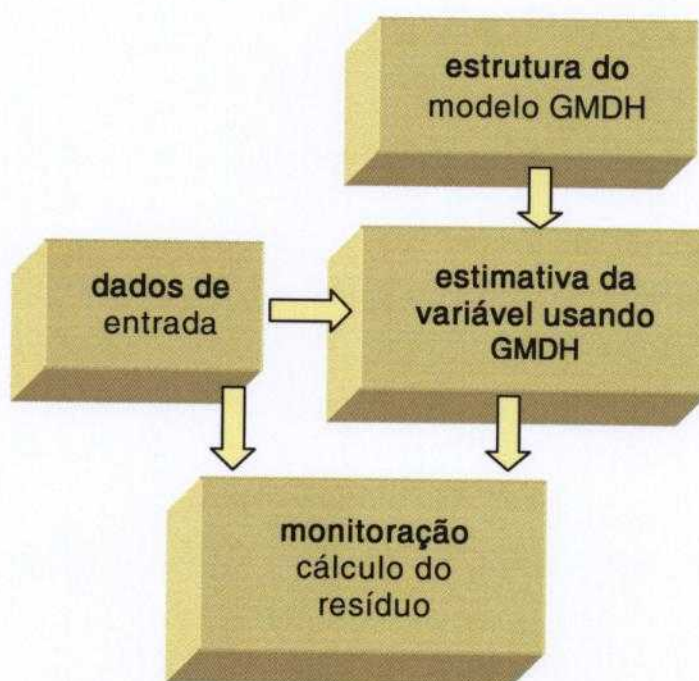


FIGURA 5. Segunda etapa da implementação do sistema de monitoração e diagnóstico: Monitoração e Cálculo do resíduo.

Na terceira etapa, os valores calculados dos resíduos de cada variável de entrada são utilizados para determinar as condições de operação do sistema. Normalmente, valores limites são usados para estabelecer os valores de resíduos que correspondam a condições normais de operação. Se algum resíduo for superior ao valor limite, isso indica a possibilidade de uma anomalia do sistema (detecção de falha). Se uma falha foi detectada, o próximo passo é identificar o componente falho. Em alguns casos, é possível que muitas variáveis do sistema sejam influenciadas pelo componente falho. Isto torna difícil conhecer qual componente é a causa e qual é a consequência pois, nesse caso, os valores de resíduos

de duas ou mais variáveis podem estar acima do valor limite. Cada condição de falha vai gerar um conjunto de resíduos característicos àquela determinada condição. Este conjunto de resíduos de todas as variáveis é chamado de *mapa de resíduos*. Pode-se considerar o mapa de resíduos como uma assinatura do sistema para determinada condição de operação.

Com a finalidade de identificar a falha, foi criado um sistema de diagnóstico. O sistema é baseado em regras geradas a partir da monitoração do sistema em condições de falhas conhecidas.

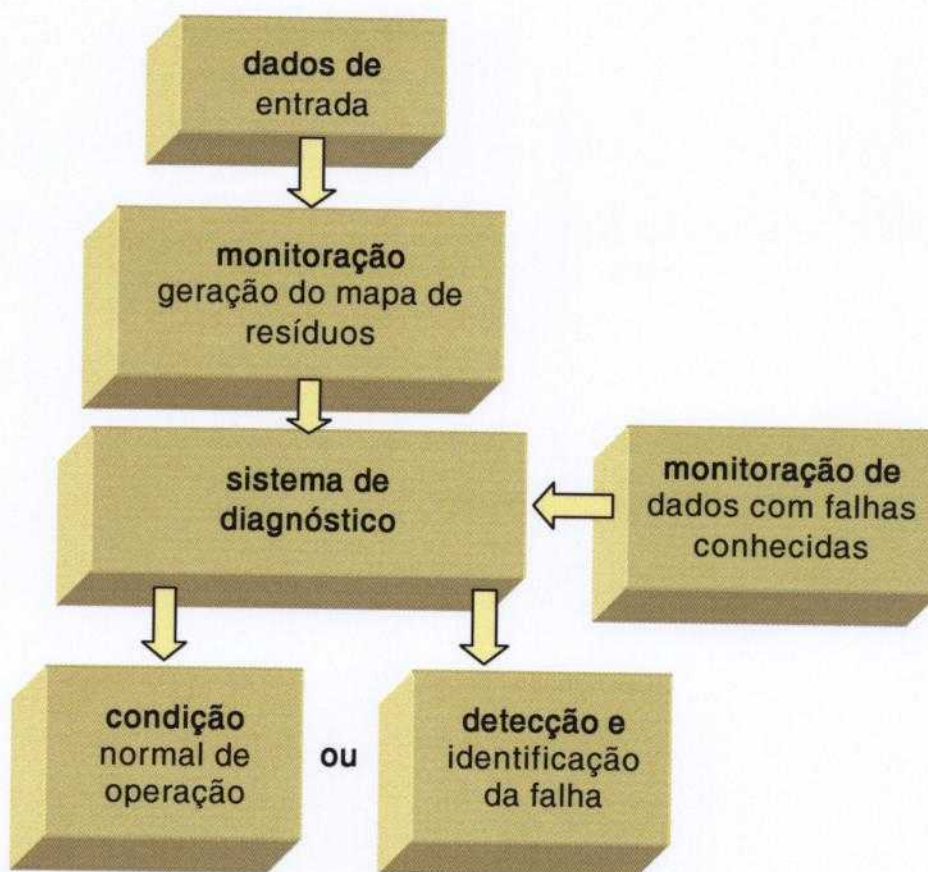


FIGURA 6. Terceira etapa de implementação do sistema de monitoração e diagnóstico: Detecção e identificação da falha.

5.2 Aplicação da metodologia

O Sistema de Monitoração e Diagnóstico foi desenvolvido utilizando a plataforma Matlab [57]. Para implementar a metodologia GMDH na monitoração, diagnóstico e detecção de falhas foram desenvolvidos três programas em Matlab:

1. **Programa GMDH:** cria as equações do modelo GMDH para uma base de dados;
2. **Programa Monitora:** monitora as variáveis utilizando as equações GMDH;
3. **Programa Diagnóstico:** detecta e identifica a falha.

Inicialmente deve-se ter um conjunto de dados com o máximo de condições de operação possíveis. Esta é a base de dados a partir da qual o Programa GMDH determina as equações do modelo GMDH. O Programa Monitora utiliza as equações desenvolvidas anteriormente para estimar o valor das variáveis e comparar com os valores lidos. Finalmente o Programa Diagnóstico detecta se há ou não falhas. Para desenvolvimento deste último programa primeiramente foram monitorados dados com falhas conhecidas. A partir dos resultados destas monitorações determina-se o sistema de diagnóstico, que define se há ou não falha, e qual o tipo de falha.

A seguir é dada uma explicação mais detalhada dos programas desenvolvidos.

Programa GMDH: cria as equações do modelo GMDH executando os seguintes passos:

1. carrega e lê o arquivo de dados
2. normaliza os dados
3. separa os dados de entrada em ajuste e verificação
4. toma as colunas dos dados de ajuste duas a duas: colunas p e q
5. constrói a equação $a+bx_p+cx_q+dx_p^2+ex_q^2+fx_px_q$
6. faz a regressão determinando os coeficientes para estas duas colunas
7. armazena os valores dos coeficientes
8. calcula o valor de z utilizando os coeficientes anteriores para todos os dados de entrada (ajuste e verificação)
9. calcula a diferença entre z e o valor real de y → resíduo
10. armazena os valores do resíduo
11. calcula para o próximo par $x_p x_q$
12. repete e guarda o valor de z na próxima coluna da matriz z

13. após calcular os resíduos para cada coluna de Z, ordena as colunas de Z de acordo com a ordem crescente de resíduo
14. armazena a forma com que as colunas foram ordenadas
15. toma um número predeterminado de colunas e as coloca como uma nova geração de dados de entrada
16. repete o processo até que o número máximo de gerações seja atingido
17. armazena os valores de resíduos e a geração correspondente ao resíduo mínimo

Na Figura 7 tem-se o fluxograma do programa GMDH.

Programa Monitora: monitora as variáveis utilizando as equações do modelo GMDH.

O programa Monitora inicialmente carrega os valores dos coeficientes, geração mínima, ordenação de colunas e resíduo mínimo calculados pelo programa GMDH e armazenados. Com estes valores, e com os valores dos dados de entrada que serão monitorados, o programa Monitora constrói as equações utilizando os coeficientes, calcula os valores de z para cada combinação das variáveis de entrada e ordena as colunas da matriz Z de acordo com o valor de ordem das colunas. Isto é feito até atingir a geração correspondente ao resíduo mínimo. O valor resultante é a melhor estimativa da variável monitorada. O programa compara o valor estimado pelo GMDH com o valor lido da variável de entrada. Os valores de resíduos das variáveis monitoradas são utilizados no programa diagnóstico.

Na Figura 8 tem-se o fluxograma do programa Monitora.

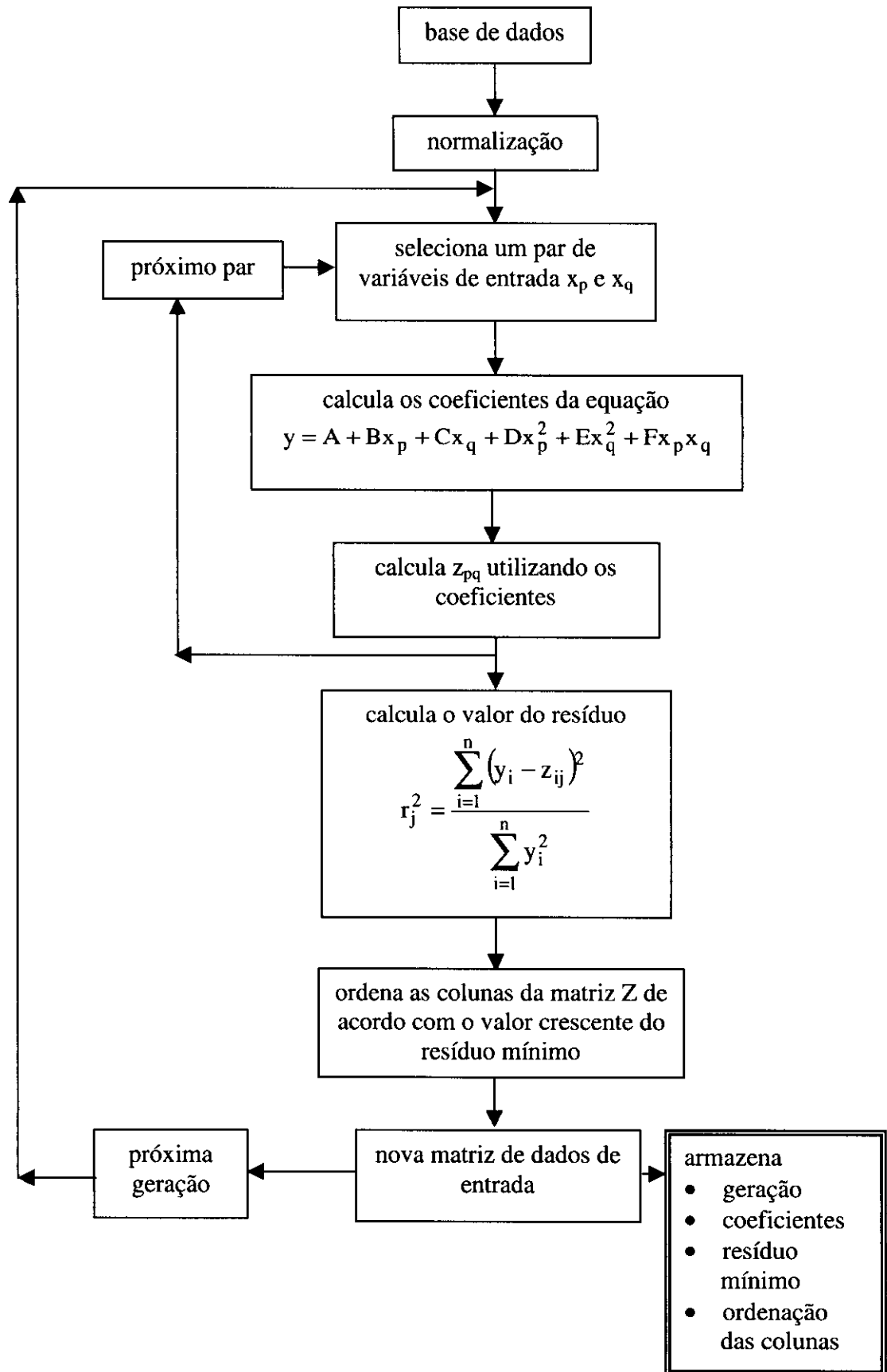


FIGURA 7. Fluxograma do programa GMDH.

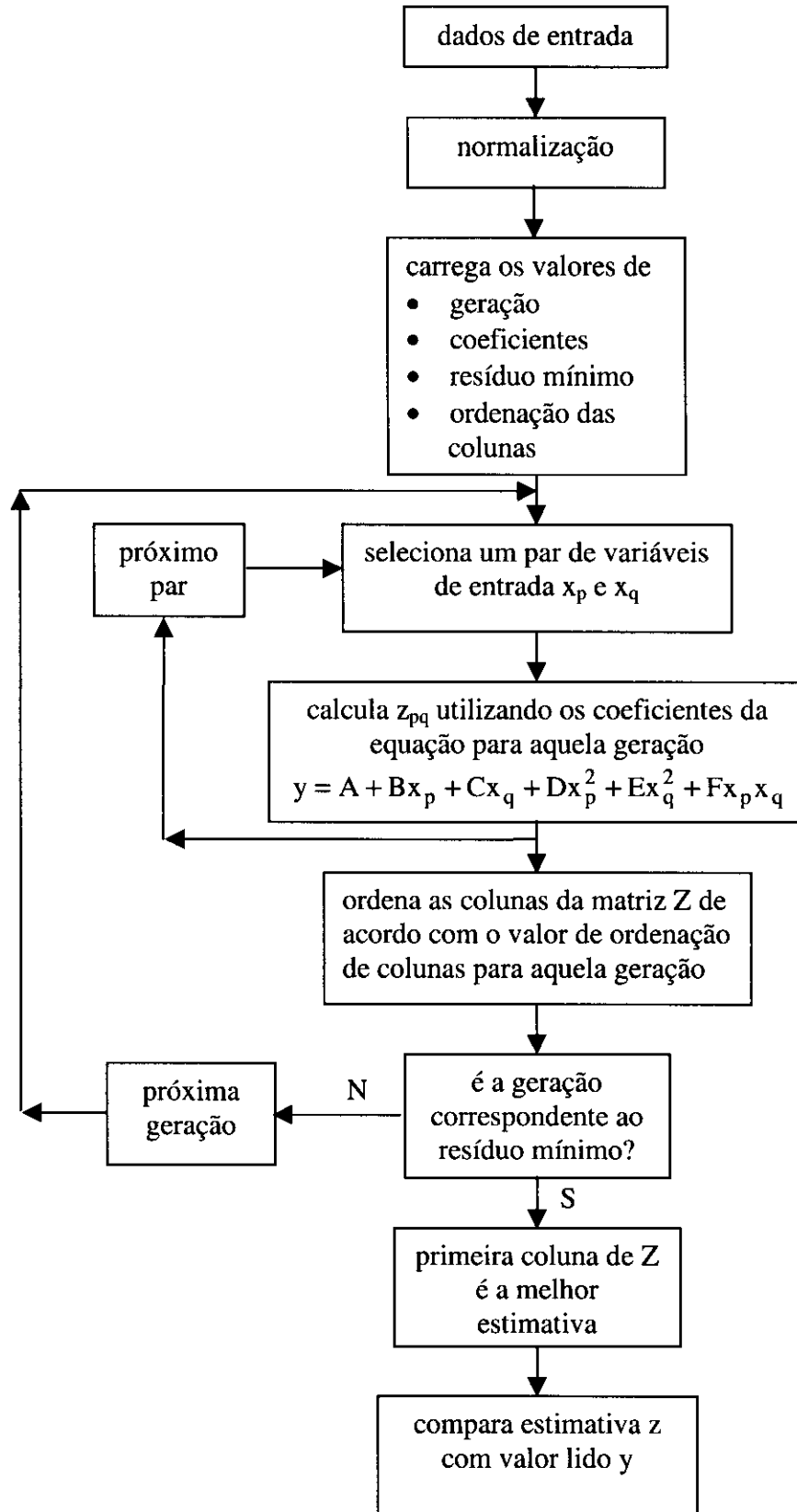


FIGURA 8. Fluxograma do programa Monitora.

Programa Diagnóstico: detecta e identifica a falha.

Para construir o conjunto de regras do sistema de diagnóstico primeiramente foram monitorados dados com falhas conhecidas. A diferença entre a variável monitorada e sua estimativa obtida pelas equações GMDH, chamada resíduo, foi armazenada. O conjunto de valores dos resíduos de cada variável, em cada falha, foi chamado de *mapa de resíduos*. A partir do mapa de resíduos pode-se detectar e identificar a falha.

O diagnóstico é então feito com base nos valores calculados de resíduos, aplicando-se as regras previamente estabelecidas. A saída do programa fornece a mensagem de ocorrência ou não de falha e em caso de falha, qual o tipo (Figura 9).

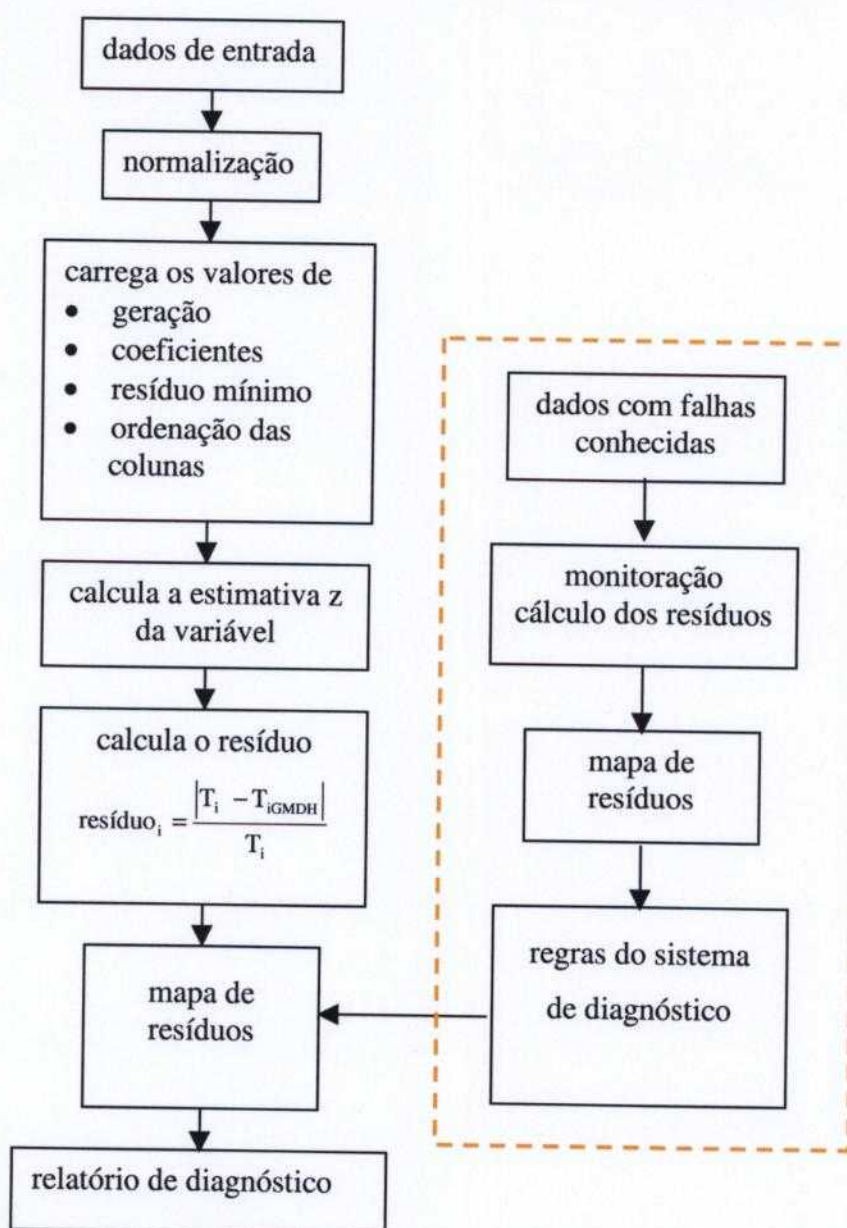


FIGURA 9. Fluxograma do programa Diagnóstico.

6 BASE DE DADOS EXPERIMENTAIS

A metodologia desenvolvida foi implementada inicialmente utilizando dados gerados por modelos teóricos, e depois foi empregada em um sistema real. O modelo teórico inicial proposto foi um trocador de calor, escolhido por ser um sistema termodinâmico simples, onde as equações que relacionam as variáveis do sistema podem ser obtidas analiticamente. Esse modelo foi utilizado para estudos exaustivos da metodologia. A seguir a metodologia foi aplicada a um modelo teórico do reator de pesquisas do Ipen IEA-R1. O modelo foi desenvolvido utilizando a ferramenta GUIDE do programa Matlab [7] e permite gerar dados para diferentes condições de operação normal, além de dados com falhas. Por fim, a metodologia foi então aplicada aos dados de operação do reator de pesquisas do Ipen.

6.1 Modelo teórico do trocador de calor

Um trocador de calor é um equipamento utilizado para transferir calor entre dois fluidos que estão separados por uma parede sólida. Os trocadores de calor são geralmente classificados de acordo com o tipo de construção e a direção de fluido. Por simplicidade, o conceito de duplo tubo e fluxo paralelo foi utilizado neste trabalho. Na Figura 10 tem-se um esquema do trocador de calor modelado.

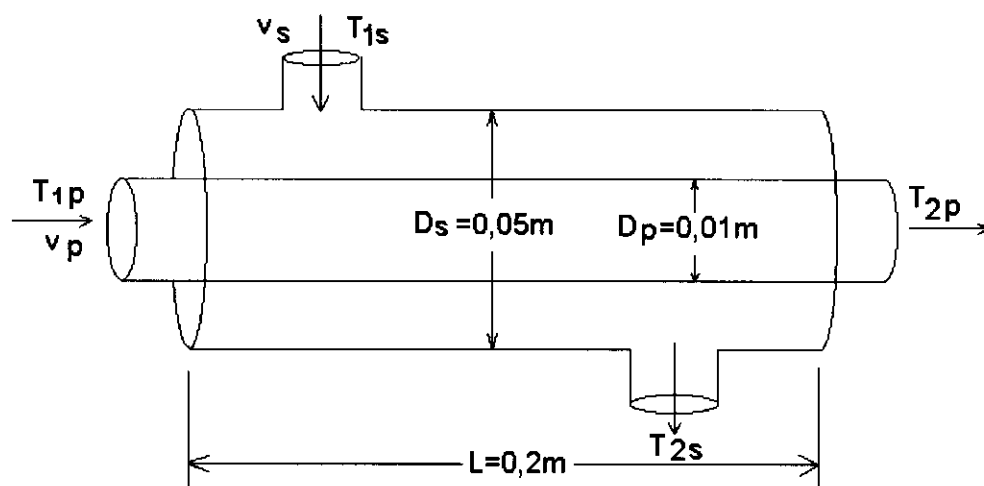


FIGURA 10. Esquema do trocador de calor.

O trocador de calor possui as seguintes características físicas e operacionais (Tabela 2), onde os valores de dimensões, velocidades e temperaturas foram escolhidos como valores típicos de trocadores de calor convencionais.

TABELA 2. Dados do trocador de calor.

diâmetro do tubo interno	0,01 m
diâmetro do tubo externo	0,05 m
comprimento	0,2 m
velocidade no lado primário	0,125 a 5 m/s
velocidade no lado secundário	0,031 a 3 m/s
temperaturas	0 a 100°C
fluido de trabalho	água

As equações de transferência de calor são dadas por [34] :

$$Q = \rho_p \cdot v_p \cdot \pi \cdot \frac{D_p^2}{4} \cdot c_p \cdot (T_{1p} - T_{2p}) \quad (14)$$

$$Q = \rho_s \cdot v_s \cdot \pi \cdot \frac{D_s^2}{4} \cdot c_p \cdot (T_{2s} - T_{1s}) \quad (15)$$

$$Q = U \cdot A \cdot \left[\frac{(T_{1p} - T_{1s}) - (T_{2p} - T_{2s})}{\ln \left(\frac{T_{1p} - T_{1s}}{T_{2p} - T_{2s}} \right)} \right] \quad (16)$$

onde:

Q : potência

v : velocidade

ρ : massa específica

D : diâmetro

T : temperatura

c_p : calor específico

U : coef. de transferência de calor global

k : condutividade térmica

A : área de transferência de calor

os subscritos p e s significam *primário* e *secundário*

os subscritos 1 e 2 significam entrada e saída

Embora as propriedades termodinâmicas da água variem com a temperatura, os seguintes valores foram considerados constantes no modelo: $c_p = 4186 \text{ J/kg } ^\circ\text{C}$, $k = 0,65 \text{ W/m } ^\circ\text{C}$, $\mu = 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ kg/s m}$, $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$. Isso foi feito apenas com o intuito de simplificar o modelo, visto que o seu objetivo é ser utilizado como uma ferramenta para melhor entendimento da metodologia GMDH.

Foi desenvolvido um programa em Matlab que calcula a potência do trocador de calor de acordo com as equações de transferência de calor. Na Tabela 3 tem-se os valores de temperatura de entrada do primário, temperatura de entrada do secundário, vazão do primário e vazão do secundário do trocador de calor. Foi calculado o valor da potência térmica do trocador de calor para todas as combinações possíveis de temperaturas e vazões do primário e secundário, resultando 54 diferentes condições de operação do trocador de calor. Esses valores foram utilizados como base de dados para criar o modelo GMDH do trocador de calor.

TABELA 3. Dados de operação do trocador de calor.

temperatura de entrada ($^\circ\text{C}$)		velocidade (m/s)	
primário	secundário	primário	secundário
20	0	0,125	0,031
60	45	2,5	1,5
100	90	5	3

Utilizando essa base de dados, foi construído um modelo GMDH do trocador de calor, onde as variáveis de entrada são as temperaturas de entrada do lado primário e secundário, e as vazões do primário e secundário. A variável de saída é a potência do trocador de calor. Desta forma pode-se comparar os valores de potência estimados pelo modelo GMDH com valores calculados analiticamente.

6.2 Modelo teórico do reator IEA-R1

O reator de pesquisas do Ipen IEA-R1 é um reator tipo piscina, refrigerado e moderado a água leve, usando berílio como refletor. No item 6.3 a seguir tem-se uma descrição mais detalhada do reator. O objetivo do desenvolvimento de um modelo teórico do reator de pesquisas do Ipen é ter uma ferramenta que possa gerar dados em diversas condições de operação do reator, permitindo uma flexibilidade de situações que não são possíveis de se obter experimentalmente devido a restrições inerentes à natureza de operação de um reator nuclear. Além de obter dados do reator em condições normais de operação, o modelo permite gerar dados com falha. Os dados gerados pelo modelo do reator IEA-R1 foram reunidos para formar um banco de dados utilizado para o estudo e desenvolvimento da metodologia GMDH.

O modelo elaborado representa as relações básicas entre as diferentes variáveis de processo. O reator possui dois circuitos de refrigeração e optou-se por representar no modelo apenas um circuito de refrigeração. As equações que descrevem os processos de transferência de calor no circuito de refrigeração do reator foram extraídas do relatório Balanço de Massa e Energia do Circuito Secundário do Reator IEA-R1 [4]. As variáveis do reator IEA-R1 representadas no modelo teórico são mostradas na Tabela 4.

TABELA 4. Variáveis do modelo teórico do reator IEA-R1.

variável	descrição
T1	Temperatura na superfície da piscina [°C]
T2	Temperatura a meia altura da piscina [°C]
T3	Temperatura sobre o núcleo do reator [°C]
T4	Temperatura na entrada do tanque de decaimento [°C]
T6	Temperatura na saída do tanque de decaimento [°C]
T7	Temperatura na saída do primário [°C]
T8	Temperatura na entrada do secundário [°C]
T9	Temperatura na saída do secundário [°C]
FE-01 (mp)	Vazão do primário [gpm]
FE-02 (ms)	Vazão do secundário [gpm]

O modelo do reator IEA-R1 desenvolvido permite:

- gerar dados para diferentes condições de operação;
- inserir valores das variáveis de entrada de forma rápida e fácil utilizando uma interface gráfica;
- variar o nível de ruído das variáveis de entrada;
- selecionar uma variável com falha a partir de uma lista de variáveis;
- visualizar de forma rápida os resultados dos cálculos efetuados.

O modelo do reator de pesquisas do Ipen foi elaborado utilizando a ferramenta GUIDE do Matlab [7]. A ferramenta GUIDE é composta por um conjunto de funções projetadas para desenvolver interfaces de forma fácil e rápida. A ferramenta possibilita o desenvolvimento de interfaces com gráficos e botões que executam determinadas funções do Matlab quando são pressionados.

A interface do programa foi criada de forma a lembrar o fluxograma de processo do reator IEA-R1. Na Figura 11 a seguir tem-se a interface do programa.

A interface apresenta os valores de potência térmica (MW) calculados no núcleo e no lado primário do trocador de calor.

O modelo desenvolvido permite que sejam adicionadas falhas às variáveis. A variável com falha é selecionada a partir de uma lista contendo todas as variáveis do modelo. A primeira opção da lista é "sem falha", ou seja serão gerados dados de operação normal.

Pode-se determinar o nível de ruído das variáveis de entrada. Para tanto, tem-se uma nova janela onde pode-se determinar o valor do nível de ruído (em %) para as variáveis de entrada.

Finalmente pode-se determinar o número total de pontos que serão gerados para as condições estabelecidas. Nesse caso, o programa calcula para um ponto, atualiza os valores necessários, e reinicia o cálculo para o próximo ponto.

Pode-se digitar diretamente os valores desejados nas caixas de edição da interface, ou seja, temperaturas, vazões ou potência nuclear. Depois de escolhidas as variáveis de entrada, nível de ruído, condições de falha e o número de pontos, através do botão *calcular*, o programa calcula o valor da potência de acordo com as equações do balanço térmico.

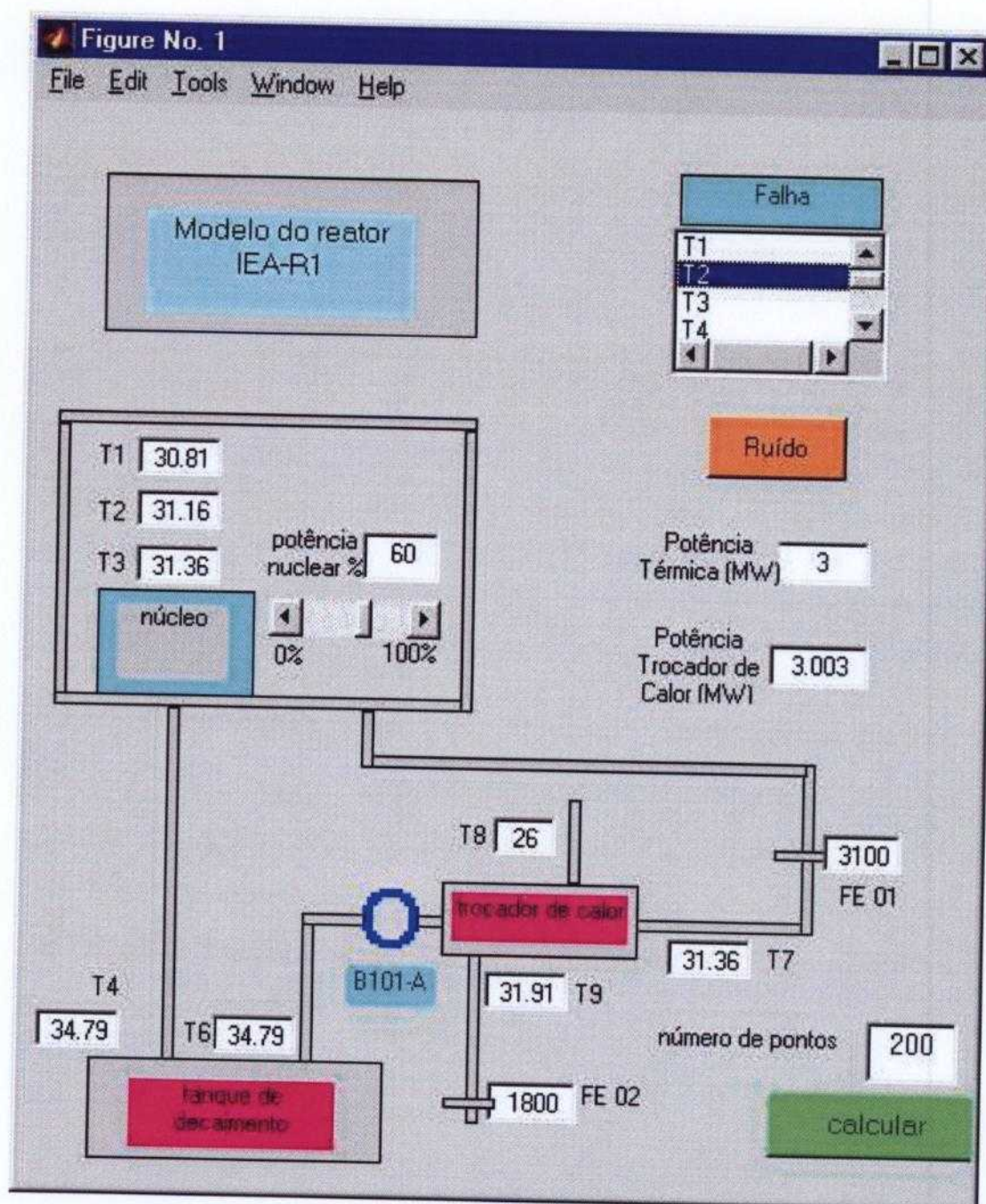


FIGURA 11. Interface do programa desenvolvido para calcular as variáveis do modelo teórico do reator IEA-R1.

A função *calcular* executa os seguintes passos:

- lê e carrega os valores das variáveis que estão na tela;
- verifica qual variável contém falha (ou se não há variável com falha);
- adiciona às variáveis T3, T8, vazão do primário e vazão do secundário os valores de ruído estabelecidos;
- calcula o valor da potência térmica fornecida pelo núcleo do reator, utilizando os valores de T3, T4 e vazão do primário;
- calcula os valores de potência térmica do trocador de calor no lado do circuito primário e no lado do secundário;
- atualiza na figura os valores de temperatura e potência do trocador de calor após o cálculo da potência para cada ponto;
- armazena todos os valores em uma matriz de dados, onde as colunas são os valores das variáveis T1, T2, T3, T4, T6, T7, T8, T9, FE02, FE01 e potência;
- fornece um gráfico dos dados gerados.

6.3 O reator IEA-R1

O Reator IEAR1 é um reator tipo piscina, refrigerado e moderado a água leve, usando berílio como refletor. Sua primeira criticalidade foi atingida em 16 de setembro de 1957. Desde esta data ele foi operado a 2 MW de potência, e a partir de 1997 sofreu um processo de modernização para poder operar a níveis mais altos de potência.

Para propiciar o novo ciclo de operação do reator IEA-R1 foram necessárias alterações no sistema de refrigeração do reator, sistemas de combate a incêndio, sistema de ventilação, sistemas elétricos, e sistemas de monitoração da radiação. Um novo sistema de resfriamento de emergência baseado em spray passivo também foi instalado. Por esse motivo, a implantação de um sistema de monitoração e detecção de falhas no reator IEA-R1 torna-se importante como parte de uma estratégia da gestão do envelhecimento da instalação.

As finalidades do reator são [24]:

- Produção de radioisótopos para aplicações na medicina, indústria, agricultura e para pesquisas;
- Servir como uma fonte intensa de nêutrons em experimentos científicos de física nuclear, química, engenharia e biologia;
- Treinamento do corpo científico do IPEN-CNEN/SP em física de reatores, projetos, desenvolvimento de instrumentação nuclear e segurança de reatores;
- Treinamento e formação de operadores de reator;
- Análise radioquímica de amostras através do método de análise por ativação.

O prédio do reator IEA-R1 é composto por cinco pavimentos, assim distribuídos:

- Subsolo: onde se localiza a Casa das Máquinas;
- 1º andar: Salão de Experimentos;
- 2º andar: Sala de Ventilação e Ar-Condicionado, Almoxarifados e o acesso principal do prédio;
- 3º andar: Saguão da Piscina do Reator, Sala de Controle e Oficinas de Apoio;
- 4º andar: Sala de Exaustão, com filtros e chaminé do Sistema de Exaustão do Reator.

O núcleo do reator encontra-se dentro da piscina a 6,89 metros da superfície da água (da altura do ladrão à parte superior dos elementos combustíveis) e está montado em uma placa matriz com oitenta orifícios, na qual é possível a disposição dos combustíveis

em vários arranjos experimentais. Esta placa é sustentada por uma treliça conectada a uma plataforma móvel, onde estão montados os quatro mecanismos de acionamento das barras e detectores que enviam sinais para a mesa de controle.

Oito tubos colimadores com diâmetros de 6 e 8 polegadas dispostos radialmente ao núcleo do reator e um tubo tangencial à face sul do núcleo são usados para experimentos com nêutrons. Outros dois tubos colimadores estão colocados em frente à coluna térmica.

A piscina possui um volume de água de 272 m^3 , sendo dividida em dois compartimentos. O primeiro destina-se à estocagem, manuseio de material radioativo e elementos combustíveis, e o segundo contém o núcleo do reator e é destinado à operação. A piscina é revestida internamente por chapas de aço inoxidável, sendo que a blindagem radiológica que envolve o núcleo é feita por uma camada de água de 2 metros de espessura na região lateral, e até 2,4 metros de concreto com barita nas paredes da piscina.

Os circuitos de resfriamento do núcleo foram construídos com redundância, sendo que apenas um circuito é suficiente para remover a potência nominal de operação do reator a 5 MW. A forma com que foram projetados permite alternar circuitos e alinhamentos dos seus diversos componentes.

Cada circuito de resfriamento consiste de:

- Uma bomba do circuito primário;
- Uma bomba do circuito secundário;
- Um trocador de calor;
- Uma torre de resfriamento do circuito secundário;
- Válvulas de fechamento automático posicionadas na saída e no retorno da água isolam o circuito primário em caso de perda do refrigerante. Um outro sistema permite que haja resfriamento do núcleo em caso de exposição do núcleo.

Um tanque de decaimento localizado no circuito primário de resfriamento funciona como um retardo para o retorno da água para a piscina, possibilitando o decaimento do ^{16}N formado na água através da reação $^{16}\text{O}(n,p)^{16}\text{N}$.

O elemento combustível usado é do tipo MTR (Material Testing Reactor) com 18 placas planas contendo urânio enriquecido a 20%.

O controle de reatividade do reator é feito através de três barras de segurança e uma barra de controle, do tipo placa, as quais são movimentadas no núcleo por um mecanismo de acionamento constituído de motores síncronos. As barras são sustentadas

por magnetos que são desenergizados no caso de algum evento não usual, fazendo-as cair por ação da gravidade, desligando o reator.

Duas câmaras de ionização não compensadas, uma câmara de ionização compensada e uma câmara de fissão fazem parte da instrumentação nuclear, que enviam sinais para a mesa de controle localizada na sala de controle. Também na sala de controle estão instalados os instrumentos de apoio à operação, abaixo relacionados:

- Monitores de radiação de área, dutos e contaminação de ar;
- Sistema de Alarmes de Radiação;
- Comando das bombas dos circuitos primário, secundário e ventiladores das torres de resfriamento;
- Comandos do Sistema de Ventilação e Exaustão de Ar-Condicionado;
- Alarme de incêndio;
- Comando do Sistema de Resfriamento de Emergência;
- Comando das válvulas de isolamento do circuito primário;
- Iluminação de emergência;
- Indicação de condutividade de água da piscina e da água de reposição;
- Sistema de análise de vibração dos mancais dos volantes de inércia;
- Comunicação interna e externa.

O Sistema de Ventilação e Ar-Condicionado (SVAC) mantém o prédio depressurizado nas áreas com maior risco de contaminação, tais como: Saguão da Piscina, Casa de Máquinas e Salão de Experimentos. Estas áreas estão isoladas do restante do prédio por antecâmaras.

A água da piscina do reator é mantida em boa qualidade por sistemas de resinas trocadoras de íons, consistindo nos Sistemas de Tratamento e Retratamento da Água. O Sistema de Tratamento é utilizado para completar o nível de água da piscina com a pureza necessária aos níveis operacionais. O Sistema de Retratamento opera continuamente e tem como finalidade a manutenção da qualidade da água da piscina de maneira a minimizar os efeitos de corrosão e os níveis de dose de radiação na superfície da piscina.

O fornecimento de energia elétrica é feito por meio da rede elétrica da concessionária local. No caso de uma eventual interrupção no fornecimento, um conjunto de quatro geradores fornecem energia elétrica aos sistemas vitais e essenciais para manter o reator em operação.

Os principais sistemas do reator enviam sinais à mesa de controle, onde por meio de uma cadeia de relés, compõem o Sistema de Intertravamento do circuito de segurança. Este circuito está ligado diretamente ao Sistema de Desligamento Automático do Reator (SCRAM), de maneira que, se alguma anormalidade ocorrer durante o funcionamento do reator, haverá a abertura do respectivo contato do relé e conseqüente interrupção da corrente elétrica que alimenta os magnetos que sustentam as barras de controle e de segurança, provocando a queda destas por gravidade e o conseqüente desligamento do reator.

Na Figura 12 tem-se um fluxograma de processo do reator IEA-R1.

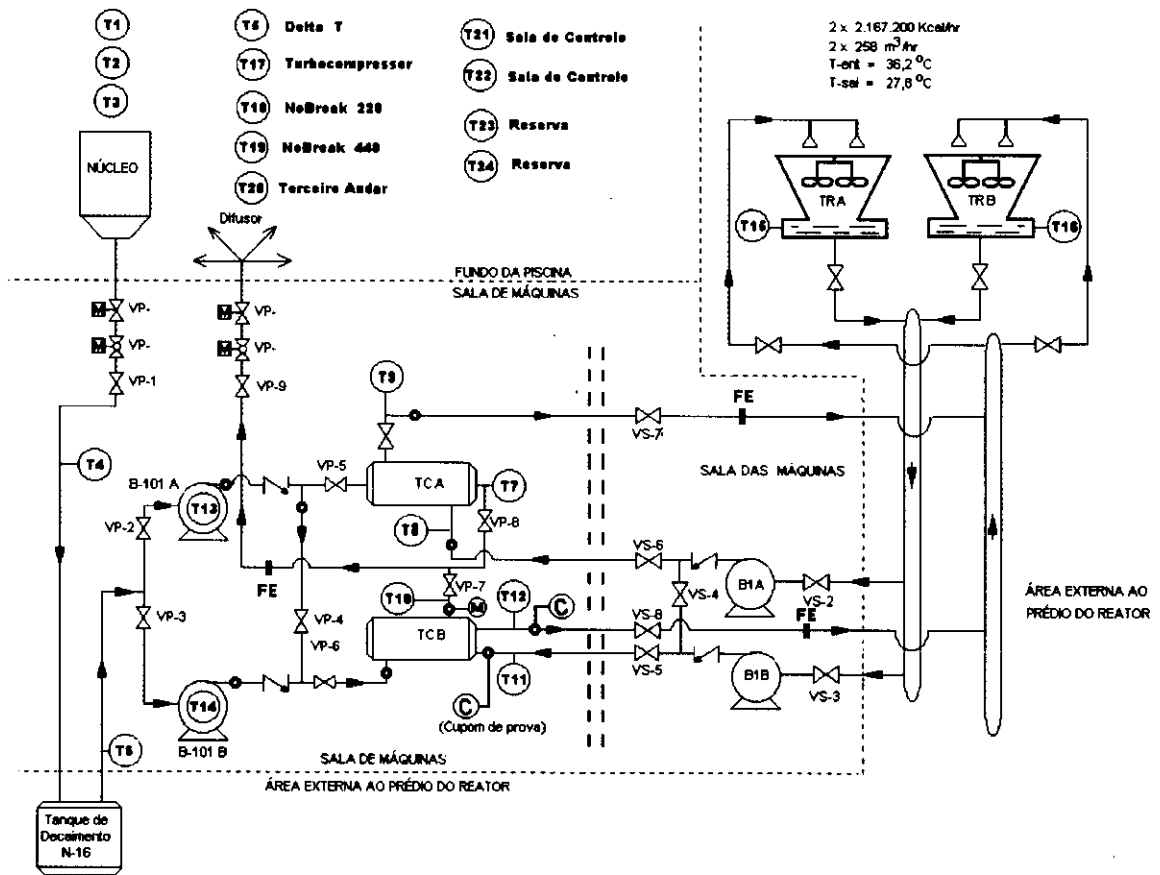


FIGURA 12. Fluxograma de processo do reator IEA-R1.

6.3.1 Sistema de Aquisição de Dados SAD

Para o desenvolvimento do Sistema de Monitoração e Diagnóstico foram utilizados os dados do Sistema de Aquisição de Dados (SAD) do reator de pesquisas do Ipen. O SAD é um sistema redundante aos sinais enviados à mesa de controle do reator e não está ligado ao Sistema de Proteção do Reator.

O SAD do reator IEA-R1 tem como principal finalidade a coleta e visualização de dados de interesse para a operação do reator, tais como temperatura, potência nuclear, radiação e posição de barras. Na Tabela 5 tem-se as variáveis coletadas e armazenadas pelo SAD.

TABELA 5. Variáveis do SAD.

Variáveis nucleares	
Z1	Posição da barra de controle [0 a 1000 mm]
Z2	Posição da barra de segurança 1 [0 a 999 mm]
Z3	Posição da barra de segurança 2 [0 a 999 mm]
Z4	Posição da barra de segurança 3 [0 a 999 mm]
N1	Período [seg]
N2	% de potência (canal de segurança 1) [%]
N3	% de potência (canal de segurança 2) [%]
N4	% de potência (canal de segurança 3) [%]
N5	Potência logarítmica (canal log) [%]
N6	% de potência (canal linear) [%]
N7	% de demanda (modo automático) [%]
N8	Potência do N16 (canal N16) [%]
Variáveis de processo	
F1M3	Vazão do primário [gpm]
F2M3	Vazão do secundário (trocaador A) [gpm]
F3M3	Vazão do secundário (trocaador B) [gpm]
F23	Vazão de água de emergência [gpm]
DP	Delta P do núcleo [V]
C1	Condutividade da água da piscina após o tratamento [μ mho]
C2	Condutividade da água da piscina antes da entrada no sistema de retratamento [μ mho]
L1	Nível da piscina [%]
Variáveis de monitoração da radiação	
R1M3	Ponte de sustentação do núcleo, lado esquerdo [mR/h]
R2M3	Ponte de sustentação do núcleo, lado direito [mR/h]
R3M3	Parede do prédio do saguão da piscina, face norte [mR/h]
R4M3	Parede da piscina, face sul, sobre o tubo de irradiação nº8 [mR/h]
R5M3	Parede da piscina, face oeste, sobre os tubos de irradiação nº3 e 4 [mR/h]
R6M3	Parede do prédio do reator, face leste, sobre os tubos de armazenamento de material radioativo [mR/h]

R7M3	Poço de coleta de água da piscina (poço SUMP) [mR/h]
R8M3	Sistema de retratamento de água – Coluna de resinas [mR/h]
R9M3	Trocador de calor A [mR/h]
R10M3	Parede ao fundo do porão, encostada ao duto de exaustão entre os trocadores de calor A e B [cps]
R11M3	Sala do ar condicionado, junto ao duto de exaustão de ar do 1º andar [cps]
R12M3	Saguão da piscina, junto ao duto de exaustão de ar [cps]
R13M3	Duto de exaustão de ar da chaminé [cps]
R14M3	Tanque de retenção [cps]
Variáveis de temperatura	
T1	Temperatura na superfície da piscina [°C]
T2	Temperatura a meia altura da piscina [°C]
T3	Temperatura sobre o núcleo do reator [°C]
T4	Temperatura na entrada do tanque de decaimento [°C]
T5	Temperatura delta T (T4-T3) [°C]
T6	Temperatura na saída do tanque de decaimento [°C]
T7	Temperatura na saída do primário (trocador A) [°C]
T8	Temperatura na entrada do secundário (trocador A) [°C]
T9	Temperatura na saída do secundário (trocador A) [°C]
T10	Temperatura na saída do primário (trocador B) [°C]
T11	Temperatura na entrada do secundário (trocador B) [°C]
T12	Temperatura na saída do secundário (trocador B) [°C]
T13	Temperatura na carcaça do motor da bomba B101-A [°C]
T14	Temperatura na carcaça do motor da bomba B102-A [°C]
T15	Temperatura externa na torre de refrigeração A [°C]
T16	Temperatura externa na torre de refrigeração B [°C]
T17	Temperatura na carcaça do motor do turbo compressor [°C]
T18	Temperatura no NO-BREAK –220V [°C]
T19	Temperatura no NO-BREAK – 440V [°C]
T20 a T24	Temperatura ambiente [°C]

6.3.2 Banco de dados do reator IEA-R1

O programa de interface homem-máquina original do SAD foi elaborado para emitir relatórios em impressoras. Por esse motivo, o acesso e o armazenamento dos dados do SAD não era feito de forma eficiente. Para a utilização dos dados de operação do SAD no sistema de monitoração e diagnóstico, foi desenvolvido um banco de dados [6], utilizando-se o programa Microsoft Access. O Microsoft Access é um programa que cria e gerencia banco de dados, cadastrando, organizando, relacionando, e permitindo a inclusão de novos dados, com grande facilidade. As telas criadas permitem o acesso aos dados em diferentes níveis de detalhamento: por ano, por mês e finalmente por semana de operação, existindo também a possibilidade de visualizar uma tela que contém a descrição de todas as

variáveis. O banco de dados foi desenvolvido de uma forma amigável para que diversos pesquisadores possam utilizá-lo sem grandes dificuldades.

Para facilitar o acesso e a visualização dos dados, foram feitos formulários para as respectivas tabelas e foram criadas macros que têm como objetivo automatizar um determinado tipo de tarefa. Ao iniciar o banco de dados, aparecerá a tela principal onde o usuário deverá escolher uma das seguintes opções: “Consulta por Ano”, “Variáveis do SAD” ou “Sair”. Se o usuário escolher a opção “Sair” o programa será encerrado. Se o usuário escolher a opção “Variáveis do SAD” aparecerá a tela onde o usuário poderá clicar sobre a variável desejada e aparecerá uma breve explicação sobre ela. Na opção “Consulta por ano”, aparecerá a tela onde o usuário deverá escolher o ano desejado: 2000, 2001 ou 2002. Há sempre a opção “Voltar para a tela anterior”. Para cada ano escolhido aparecerá a tela onde o usuário irá selecionar o mês desejado. Escolhido o mês, tem-se a opção de selecionar a semana de operação correspondente. Haverá uma opção para selecionar dados e transportá-los para outro aplicativo do Windows, preferencialmente o EXCEL, onde os dados selecionados podem ser trabalhados, como por exemplo a confecção de gráficos apropriados. Na Figura 13 a seguir é mostrado um esquema com o resumo das interfaces desenvolvidas.

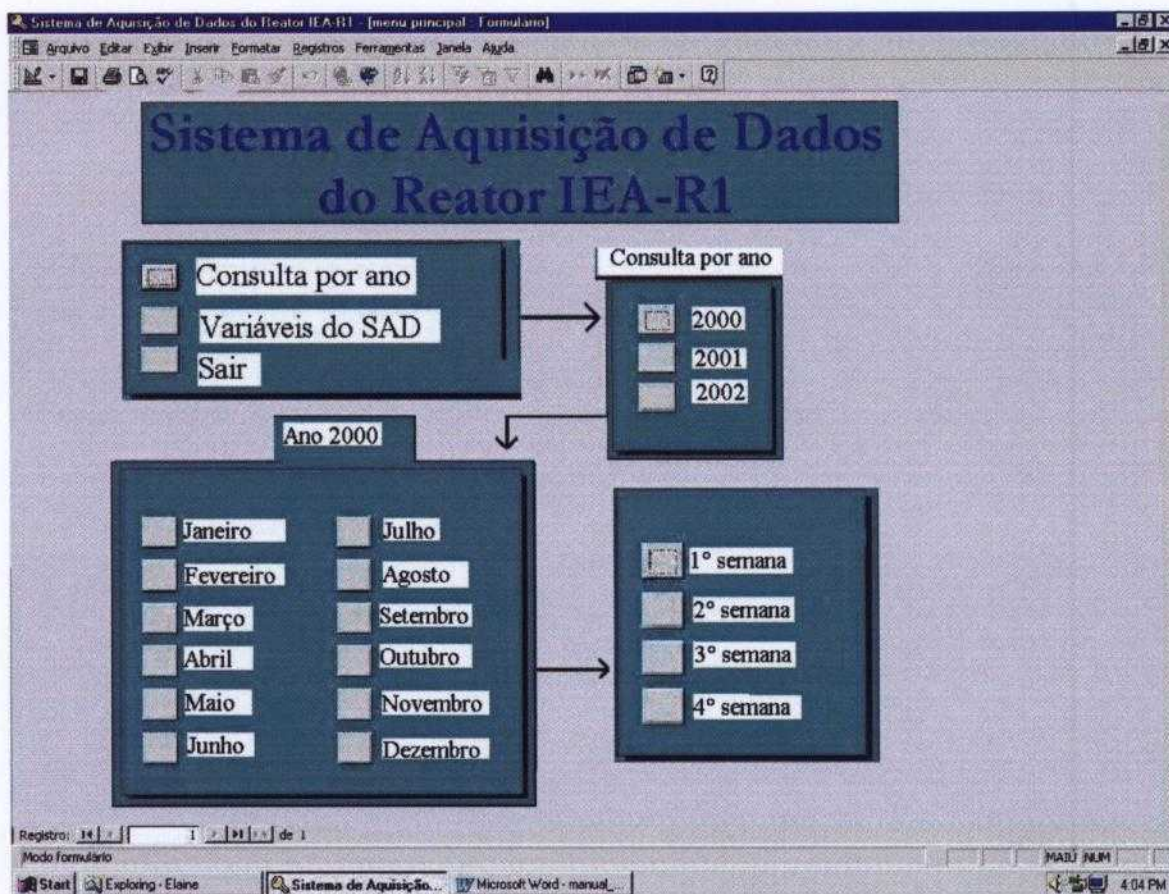


FIGURA 13. Tela de consulta de ano, mês e semana de operação do Banco de Dados do reator IEA-R1.

6.3.3 Sistema de aquisição de dados em paralelo

O programa que gerencia a aquisição e armazenamento de dados do SAD está instalado de tal forma que não permite modificações feitas por pessoas não autorizadas. Com a finalidade de se obter maior flexibilidade no processo de aquisição, foi implantado um outro sistema de aquisição de dados em paralelo ao existente. Os sinais digitais foram retirados diretamente nas borneiras instaladas no painel traseiro da Unidade de Aquisição e Condicionamento de Dados (UCAD) e encaminhados a um bloco de conexões da National Instruments modelo SCB-68. Desta interface, os sinais são encaminhados por cabo blindado (composto por pares de fios torcidos) e por cabo do tipo chato (flat cable) para a UCAD da National Instruments. Esse sistema utiliza 2 tipos de programas: o de interface com o cartão de aquisição e o da IHM. O programa de interface com o cartão está incluído no pacote de software conhecido como NI-DAC e é fornecido pela National Instruments junto com o cartão. O programa da IHM foi desenvolvido com o auxílio do software

Labview. Desta forma, foi possível variar alguns parâmetros de aquisição de dados, tais como, intervalo de tempo entre as aquisições, formato das variáveis (quantidade de algarismos significativos considerados), além de armazenamento das variáveis adquiridas diretamente em formato txt para posterior análise. Na Figura 14 tem-se a interface desenvolvida utilizando-se o programa Labview.



FIGURA 14. Tela do programa de aquisição de dados.

7 RESULTADOS

7.1 Resultados do modelo teórico do trocador de calor

Para o desenvolvimento da metodologia foram utilizados inicialmente dados gerados por modelos teóricos de sistemas termodinâmicos, para depois utilizar dados de operação de um sistema real. O modelo teórico inicial proposto foi um trocador de calor. Esse modelo foi utilizado para estudos preliminares da metodologia GMDH.

Os principais aspectos estudados nesta etapa foram: precisão do método, normalização, número de observações e nível de ruído.

Esses aspectos estão relacionados entre si, ou seja, a precisão depende da normalização, número de observações dos dados de entrada e nível de ruído.

Precisão do método. Como se tem um conjunto de dados gerados a partir de um modelo teórico, os valores das variáveis de entrada e de saída são conhecidos com a precisão estabelecida nos cálculos. Desta forma, ao comparar os valores estimados pelo modelo GMDH com o valor calculado, a diferença será devida apenas a fatores inerentes à metodologia utilizada.

Normalização. Como explicado no capítulo 4, o GMDH é um método que utiliza os valores das variáveis do sistema para estimar o valor de uma variável através de sucessivas equações de regressão. As variáveis do sistema têm valores que podem diferir em ordem de grandeza. Para que todas as variáveis tenham o mesmo peso na hora de escolher quais serão utilizadas no modelo, é necessário que sejam normalizadas. Se não houver normalização, o algoritmo do modelo vai escolher preferencialmente as variáveis com valores absolutos maiores, pois estes irão influenciar mais o modelo do que aquelas variáveis com valores pequenos, e isso não conduz a um melhor resultado. Existem vários tipos de normalização, como por exemplo: normalizar de -1 a $+1$, normalizar de zero a 1. Métodos mais sofisticados normalizam os valores de forma que a média seja zero e o desvio padrão igual a um. Para estudar a influência da normalização no modelo GMDH foram feitos modelos GMDH utilizando dados sem e com normalização e os resultados foram comparados.

Número de observações. Com o objetivo de quantificar a influência do número de observações no resultado do modelo GMDH, foram feitos diversos cálculos para diferentes números de observações nos dados de entrada.

Variação do nível de ruído. Os dados gerados pelo modelo do trocador de calor foram utilizados também para estudar a influência do nível de ruído dos dados de entrada no resultado final do modelo GMDH.

7.1.1 Precisão

Como visto na descrição da metodologia, o algoritmo GMDH utiliza os valores das variáveis de entrada (X) de um sistema para estimar o valor das variáveis de saída (Y) através de sucessivas aproximações polinomiais. Tomam-se as variáveis independentes duas de cada vez para todas as combinações possíveis e calculam-se os coeficientes da seguinte regressão polinomial, onde p e q são as colunas da matriz X :

$$y = A + Bx_p + Cx_q + Dx_p^2 + Ex_q^2 + Fx_px_q \quad (17)$$

Os coeficientes das equações de regressão são calculados da seguinte maneira:

$$\text{Coef} = X^{-1} \cdot Y \quad (18)$$

onde Coef é a matriz dos coeficientes [A B C D E F].

A inversão da matriz X só é possível se esta for uma matriz quadrada, e o que se tem geralmente é que o número de observações é maior que o número de variáveis do sistema. Matrizes retangulares não possuem inversa nem determinante e portanto uma das equações $\text{Coef} \cdot X = I$ ou $X \cdot \text{Coef} = I$ não tem solução. Uma solução parcial para esse problema é fornecida pela matriz pseudoinversa P [57].

A matriz $P \cdot X$ age como se fosse uma identidade em uma porção do espaço no sentido de que $P \cdot X$ é simétrica, $X \cdot P \cdot X$ é igual a X , e $P \cdot X \cdot P$ é igual a P . Porém, este método envolve a inversão de $X^T \cdot X$ (onde o índice T significa matriz transposta) o que pode causar problemas numéricos para casos em que a matriz X possui colunas linearmente dependentes. Isto ocorre quando as variáveis são altamente correlacionadas,

como por exemplo sensores redundantes ou variáveis altamente relacionadas. Nestes casos, a solução de pseudo inversão pode gerar resultados inconsistentes.

Existem várias metodologias para solucionar esse problema. Uma delas consiste em usar o critério de regularização de Tikhonov [21]. Neste caso o cálculo dos coeficientes é feito através da seguinte equação:

$$\text{Coef} = (X^T X + \alpha I)^{-1} X^T Y \quad (19)$$

O parâmetro de regularização alfa (α) pode ser compreendido como sendo o compromisso entre o quanto o modelo está próximo dos dados e suavização (smoothness). A suavização pode ser obtida com pequenos valores de α . Para grandes valores de α , por outro lado, pode-se ter um ajuste mais complexo do que o necessário (overfitting).

Após o cálculo dos coeficientes, avalia-se o polinômio para todos os pontos de dados para calcular uma nova estimativa de y , chamada z . Repete-se esta avaliação para todas as combinações de variáveis p e q , e para todos os n dados, gerando uma nova matriz Z chamada nova geração de variáveis.

A cada nova geração, é calculado o valor de RMIN, escolhido como o valor mínimo dos resíduos calculados pela equação (9) para todas as colunas da matriz Z da respectiva geração.

Neste estudo, ao invés de se estabelecer um valor limite de RMIN como critério de convergência, definiu-se um número de gerações e calculou-se o valor de RMIN correspondente, visto que o interesse é avaliar o comportamento do RMIN como índice de mérito.

A melhor estimativa de y será aquela correspondente ao menor valor de RMIN. A precisão do resultado final irá depender dos valores de alfa e do número de observações.

Com a finalidade de mostrar a dependência entre o valor de alfa e o número de observações para o cálculo dos coeficientes, foram feitos cálculos variando-se o número de observações (de dez a dez mil) e o valor de alfa (de 0,1 a 0,0001). Os resultados estão na Figura 15.

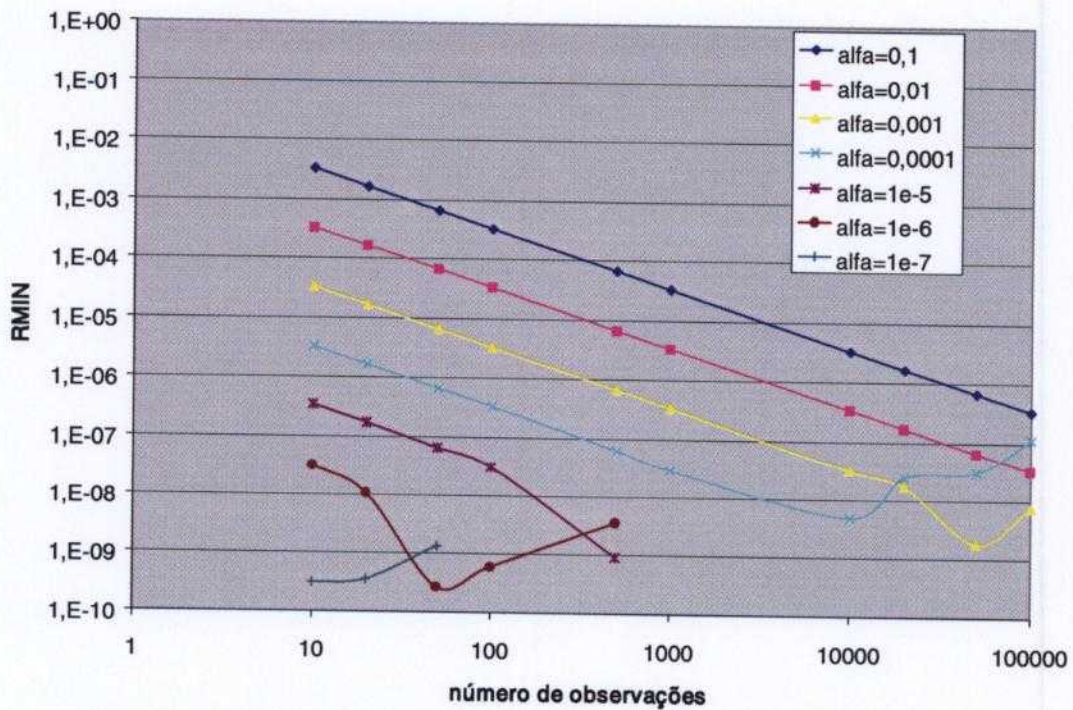


FIGURA 15. RMIN em função de alfa e do número de observações.

Da observação da Figura anterior, pode-se concluir que para número de observações maior do que 10000 e valores de alfa menores do que 10^{-5} o sistema torna-se instável. Para intervalos de valores de número de pontos e alfa dentro desses valores limites, pode-se verificar a existência de uma correlação entre os valores de alfa, número de observações e RMIN, onde se vê que a precisão final do método é um compromisso entre esses valores.

7.1.2 Normalização

Os cálculos anteriores foram repetidos, utilizando-se desta vez dados sem normalização. O valor de alfa foi mantido constante. Na Figura 16 tem-se os valores de RMIN em função do número de gerações, onde se observa que os valores de RMIN são menores para o caso em que os dados foram normalizados antes de efetuar os cálculos do modelo GMDH. Os cálculos foram feitos para número de observações = 100 e alfa = 0,001.

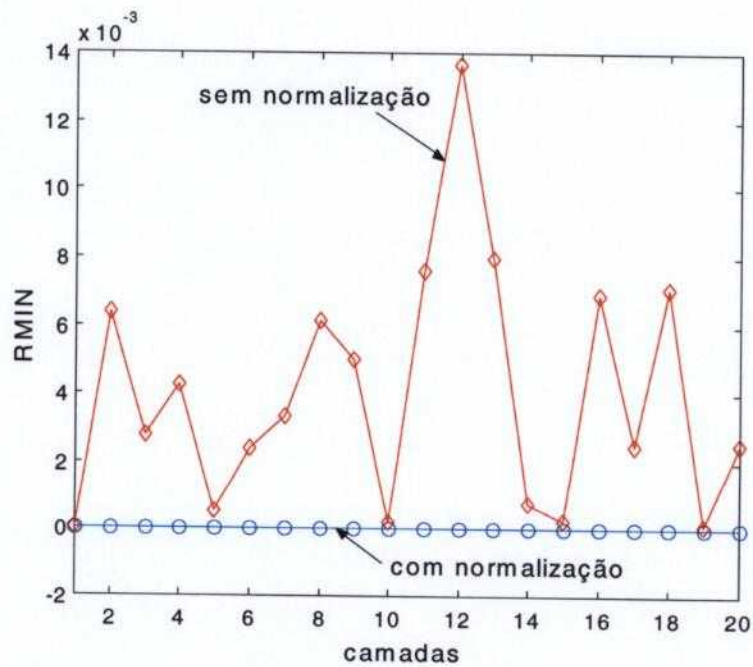


FIGURA 16. Comparação entre RMIN para dados normalizados e não normalizados.

7.1.3 Influência do número de observações

Como visto nos itens anteriores, a precisão resultante será um compromisso entre os valores de alfa e número de observações. Para ilustrar a influência do número de observações no valor do resíduo calculado, foram feitos modelos GMDH para vários números de observações, fixando-se o valor de alfa. Os resultados estão na Figura 17.

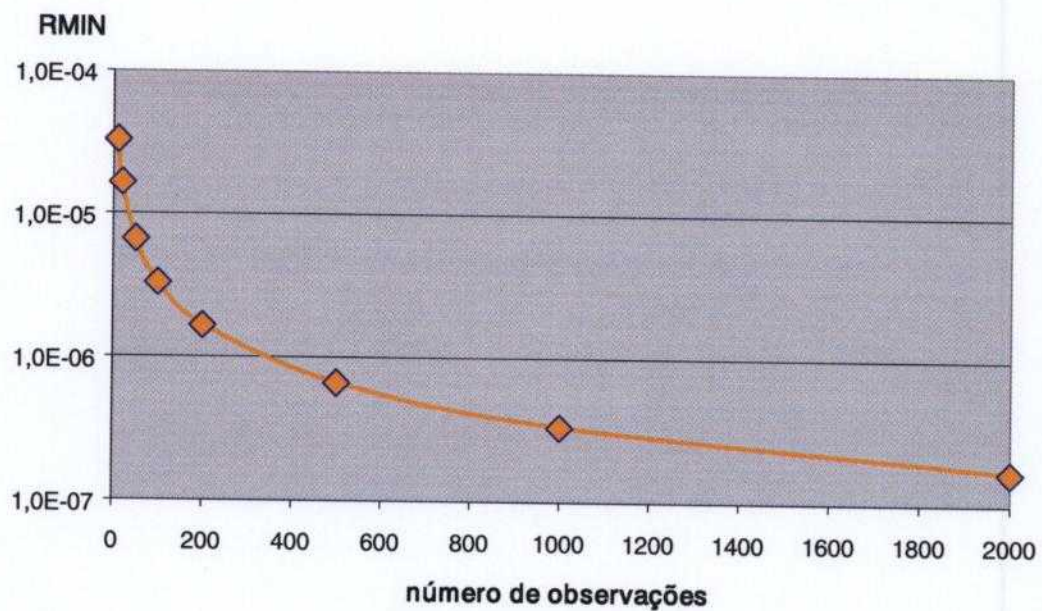


FIGURA 17. Variação de RMIN em função do número de observações.

Na curva da Figura 17 tem-se que o valor de RMIN diminui exponencialmente com o aumento do número de observações, como esperado. Essa variação é acentuada no início da curva, ou seja, para número de observações baixo, porém vai ficando menos significativa à medida que o número de observações aumenta. Além disso, para número de observações altos, o tempo de computação aumenta. Deve haver portanto um compromisso entre esses valores.

7.1.4 Variação do nível de ruído

Em relação ao estudo do aumento de nível de ruído, foram gerados dados com diferentes níveis de ruído, obtendo-se diferentes valores de RMIN. Para a geração dos dados foi utilizada a função RAND do Matlab, que gera um conjunto determinado de pontos segundo uma distribuição gaussiana. O número total de pontos foi mantido fixo e igual a 100. Os valores de ruído foram gerados de forma a terem média zero e foram adicionados ao valor médio da variável, segundo a seguinte equação:

$$X = X_0 + r \quad (20)$$

onde X é o valor da variável

X_0 é o valor da variável sem ruído (valor constante)

r é o ruído.

Na Figura 18 tem-se um exemplo de variável de valor normalizado igual a 1 e ruído de 0,10 ou seja 10% de nível de ruído.

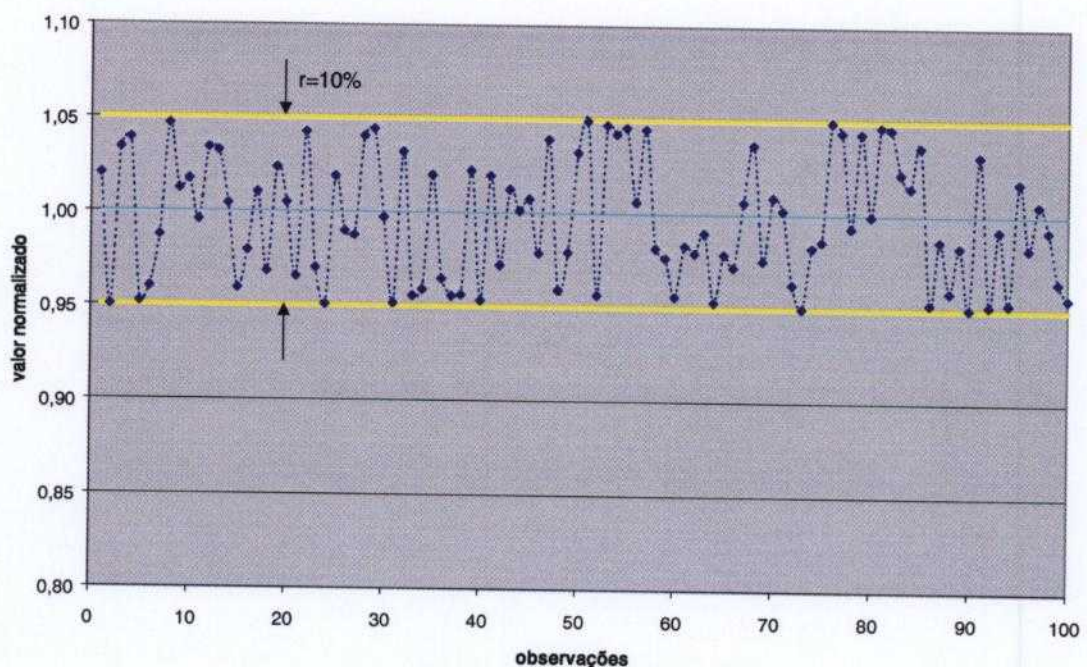


FIGURA 18. Variável com ruído de 10%.

Na Figura 19 tem-se o valor de RMIN em função do ruído. Procurou-se variar o nível do ruído desde valores bem baixos ($1e-8$ ou $0,000001\%$), próximos de dados sem ruído, até valores bem altos (10 ou 1000%), para verificação do limite de validade da metodologia. Observa-se na Figura 19 que para valores de ruído abaixo de $1e-6$ há um ponto limiar de RMIN de $3,33 e-6$, que é o valor de RMIN obtido para dados sem ruído. Para valores altos de ruído, observa-se no gráfico da Figura 19 que o valor de RMIN aumenta, e que o valor tende a 1.

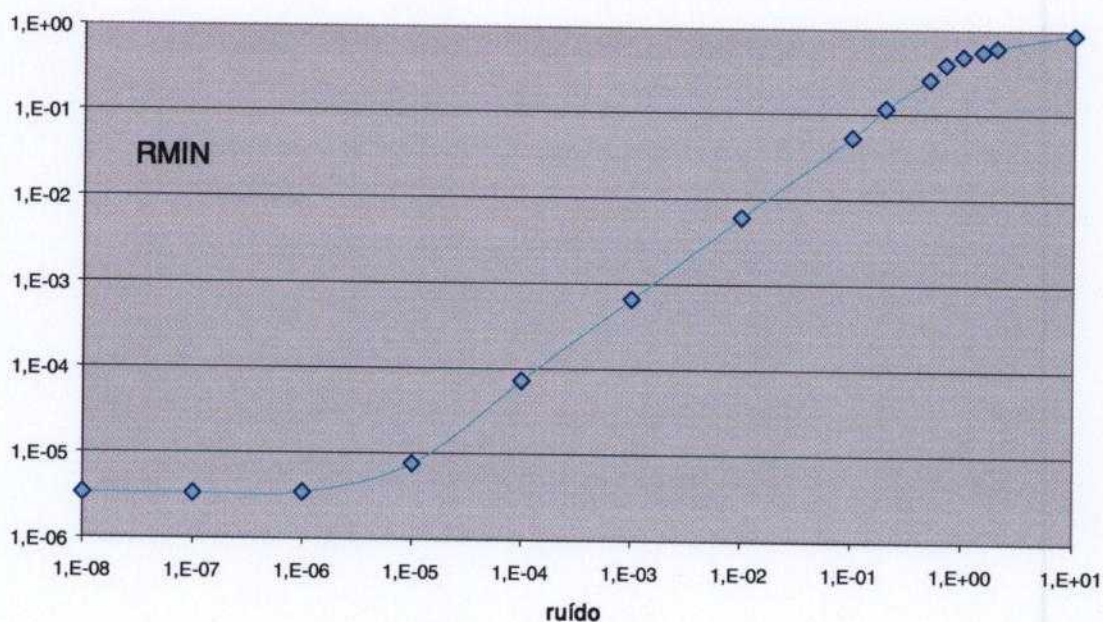


FIGURA 19. RMIN para diferentes níveis de ruído nos dados de entrada.

7.2 Resultados do modelo teórico do reator IEA-R1

O modelo teórico do trocador de calor foi utilizado para a realização de um estudo detalhado da metodologia GMDH. Nesse estudo verificou-se a influência e a importância da normalização das variáveis, do número de observações, do fator de regularização alfa e do ruído.

Nesta seção, com o modelo teórico do reator de pesquisas do Ipen IEA-R1 introduz-se um número maior de variáveis que representam um sistema mais complexo permitindo avaliar o desempenho do GMDH nessa nova situação. O modelo teórico do reator de pesquisas do Ipen IEA-R1 é utilizado para o desenvolvimento de um sistema de monitoração e diagnóstico completo, conforme descrito no capítulo 5.1. As etapas de implementação do sistema de monitoração e diagnóstico são:

1. determinação do modelo GMDH;
2. monitoração propriamente dita, onde os resultados do modelo GMDH são utilizados para fazer a estimativa da variável que será monitorada;
3. diagnóstico, ou seja, detecção e identificação da falha.

7.2.1 Determinação do modelo GMDH

O modelo teórico do reator de pesquisas do Ipen IEA-R1 permite gerar dados para diferentes condições de operação e está descrito no item 6.2.1. O modelo desenvolvido possui 10 variáveis, sendo 8 temperaturas e as vazões do circuito de refrigeração primário e secundário. O modelo permite gerar dados sem ruído ou dados com um nível de ruído.

Conforme explicado no Capítulo 5.2, para determinar o modelo GMDH é necessário ter-se uma base de dados. Os dados foram gerados para 10 diferentes condições de operação, onde a potência nuclear varia de 10 a 100% a intervalos de 10%. Os valores de vazão do primário, vazão do secundário e temperatura de entrada do secundário do trocador de calor foram mantidos constantes. O número total de pontos gerados pelo modelo teórico para cada condição de operação é 20, totalizando 200 observações, e o valor de alfa é 0,001 [21]. Foram criados dois conjuntos de base de dados: sem ruído e com ruído. Os valores de ruído escolhidos são baseados nos valores médios dos ruídos observados nos dados de operação do reator IEA-R1, que são: temperaturas = 0,4%, vazão do primário = 1% e vazão do secundário = 2%.

Nas Figuras 20 e 21 tem-se os dois conjuntos de base de dados: sem ruído e com ruído, respectivamente. Note-se que os valores das variáveis estão normalizados.

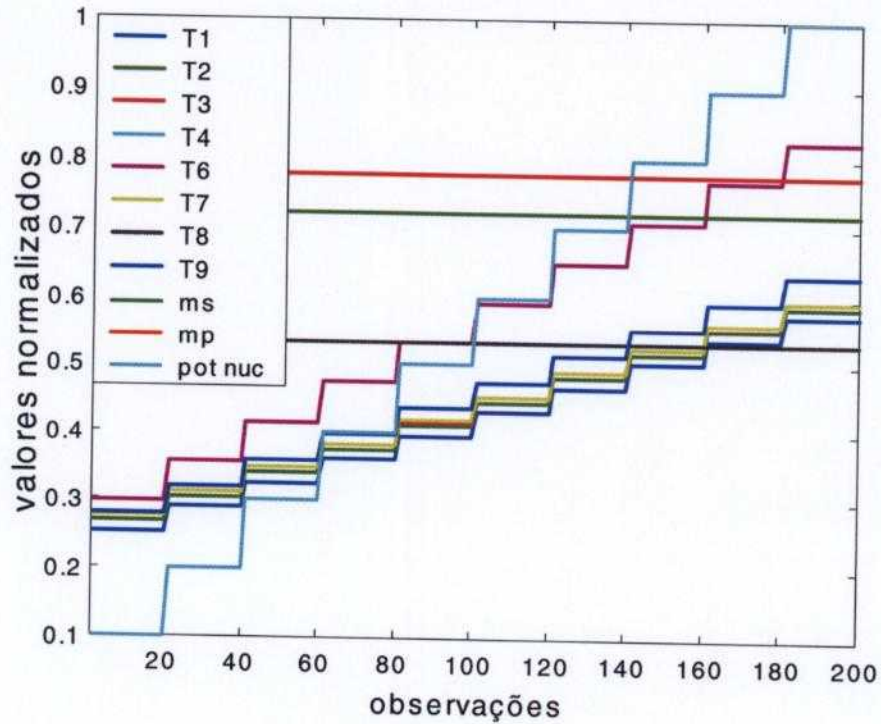


FIGURA 20. Base de dados para 10 condições de operação (sem ruído).

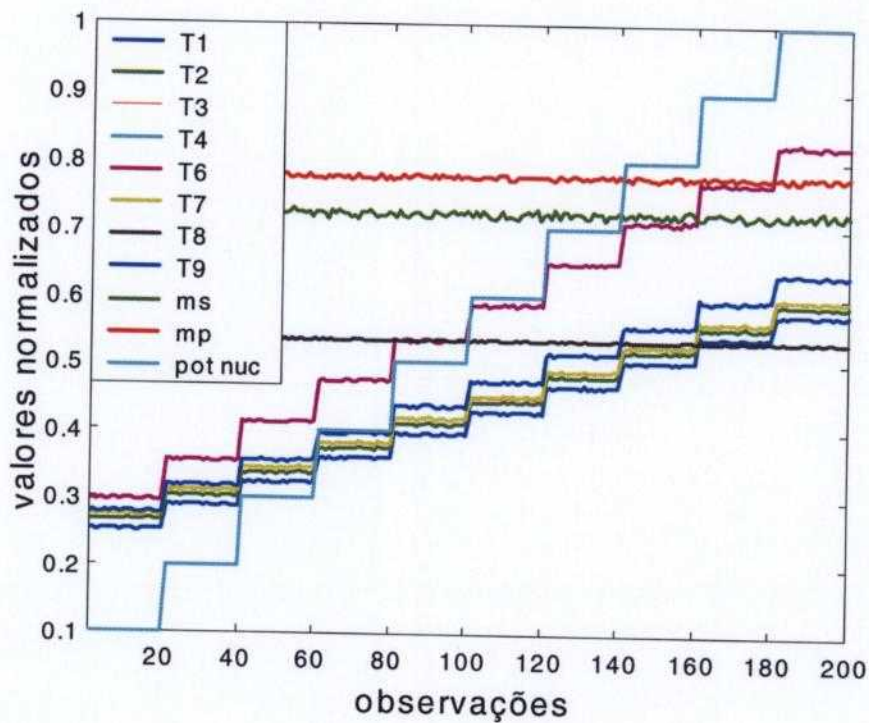


FIGURA 21. Base de dados para 10 condições de operação (com ruído).

Com essas bases de dados foram gerados os modelos GMDH utilizando o Programa GMDH. Nas Tabelas 6 e 7 a seguir tem-se o valor mínimo do desvio médio quadrático (RMIN) calculado para cada variável. Lembrando que RMIN é o menor valor de r_j calculado pela equação (9) (capítulo 4.1).

TABELA 6. RMIN e geração correspondente para base de dados sem ruído.

Variável	RMIN	geração correspondente
T1	$1,388 \cdot 10^{-4}$	1
T2	$1,3305 \cdot 10^{-4}$	1
T3	$2,3140 \cdot 10^{-4}$	1
T4	$1,7531 \cdot 10^{-4}$	1
T6	$1,7531 \cdot 10^{-4}$	1
T7	$1,2990 \cdot 10^{-4}$	1
T8	$3,2681 \cdot 10^{-6}$	1
T9	$1,3904 \cdot 10^{-4}$	1
ms	$4,0039 \cdot 10^{-6}$	1
mp	$4,3479 \cdot 10^{-6}$	1

TABELA 7. RMIN e geração correspondente para base de dados com ruído.

Variável	RMIN	geração correspondente
T1	$9,7028 \cdot 10^{-4}$	1
T2	$9,5927 \cdot 10^{-4}$	1
T3	0,0014	1
T4	0,0013	1
T6	0,0013	1
T7	$9,5325 \cdot 10^{-4}$	1
T8	0,0011	8
T9	0,0011	1
ms	0,0058	6
mp	0,0029	4

Observando-se os dados das Tabelas 6 e 7 pode-se fazer os seguintes comentários:

- para dados sem ruído o valor de RMIN é menor do que os valores de RMIN obtidos com dados com ruído;
- para a maioria dos casos, o valor de RMIN foi atingido já na primeira geração do algoritmo;
- no caso de dados sem ruído, os valores de RMIN são menores para as variáveis T8, ms e mp. Isso se explica pelo fato de estas variáveis terem valores constantes;
- no caso dos dados com ruído, os valores de RMIN obtidos para as variáveis T8, ms e mp são da mesma ordem de grandeza dos demais. Porém, pode-se observar que foram necessárias maior número de gerações para atingir esses valores.

7.2.2 Monitoração

A seguir utilizou-se o Programa Monitora (Capítulo 5.2) para monitorar novos dados gerados pelo modelo do reator IEA-R1. Foram gerados novos conjuntos de dados para todas as condições estabelecidas na base de dados.

Com a finalidade de ilustrar os resultados de monitoração dos dados gerados pelo modelo do reator IEA-R1, foi feito o gráfico mostrado na Figura 22 onde tem-se a comparação entre o valor da variável T1 e seu valor estimado pelo modelo GMDH, para condição de operação de potência nuclear de 80 % (4 MW). Os resultados para as outras variáveis e condições de operação são semelhantes.

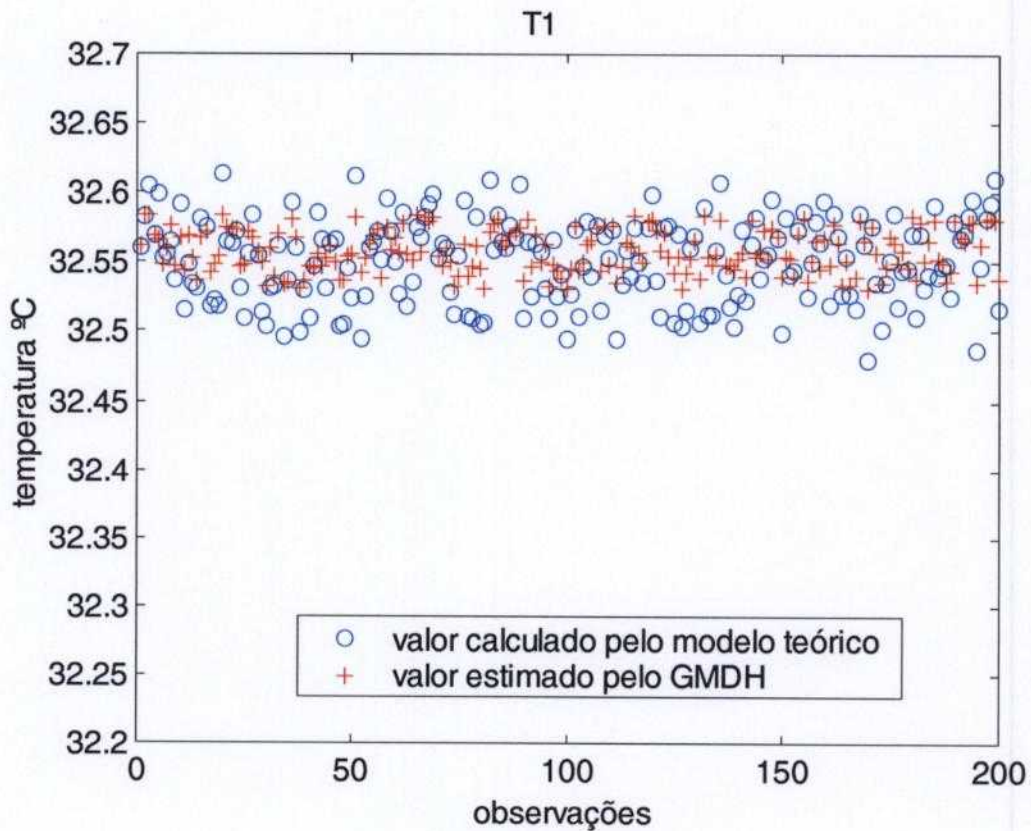


FIGURA 22. Comparação entre os valores calculados e estimados pelo GMDH da variável T1 do modelo teórico do reator IEA-R1.

A diferença entre o valor calculado pelo modelo do reator IEA-R1 e o valor estimado pelo GMDH é chamada de resíduo, definido pela equação (21):

$$\text{resíduo}_i = \frac{|T_i - T_{i\text{GMDH}}|}{T_i} \times 100(\%) \quad (21)$$

onde i é o número da observação

T_i é o valor calculado da variável T1 na observação i

$T_{i\text{GMDH}}$ é o valor da variável T1 estimado pelo GMDH

Na Figura 23 tem-se os valores de resíduos em porcentagem calculados de acordo com a equação (21).

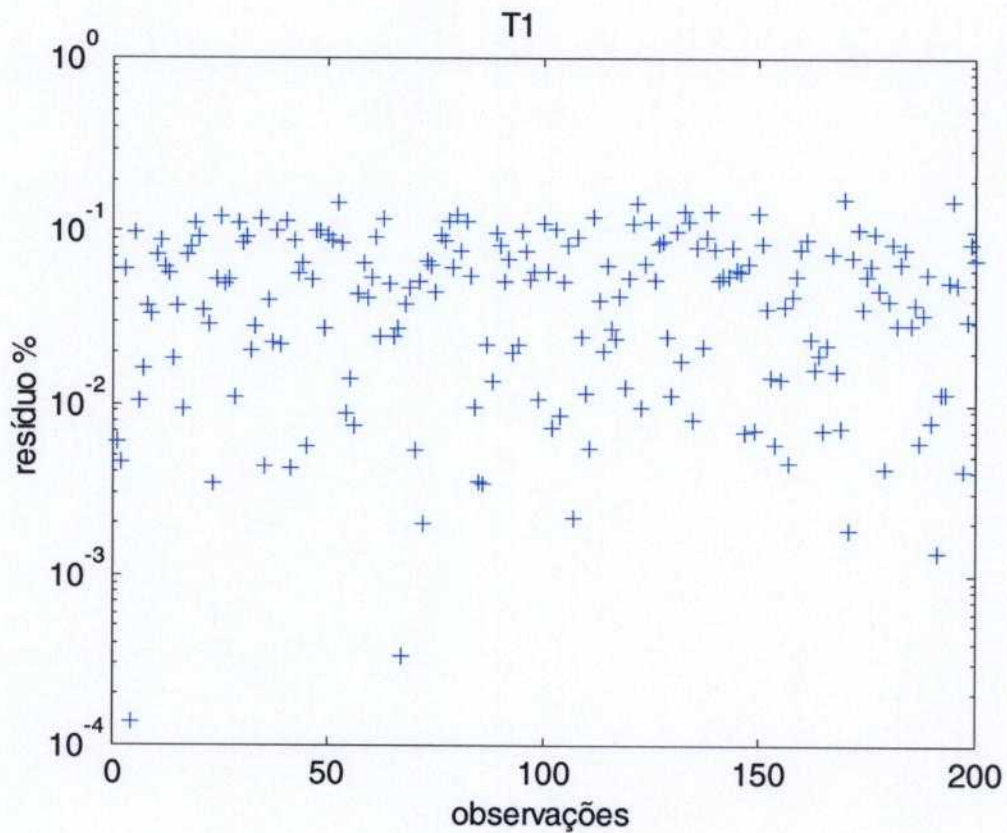


FIGURA 23. Valor dos resíduos da variável T1 do modelo teórico do reator IEA-R1.

Nas Figuras 24 e 25 a seguir tem-se os valores de resíduos para cada variável monitorada, considerando as 10 diferentes condições de potência de operação. O resíduo é a diferença entre o valor da variável calculado pelo modelo do reator e o seu valor estimado pelo modelo GMDH, dividido pelo valor calculado pelo modelo do reator. O gráfico de resíduos de todas as variáveis é chamado de mapa de resíduos. Para o caso de dados sem ruído, esse valor é constante para todos os pontos, e para o caso de dados com ruído, foi considerado o **valor máximo dos resíduos**.

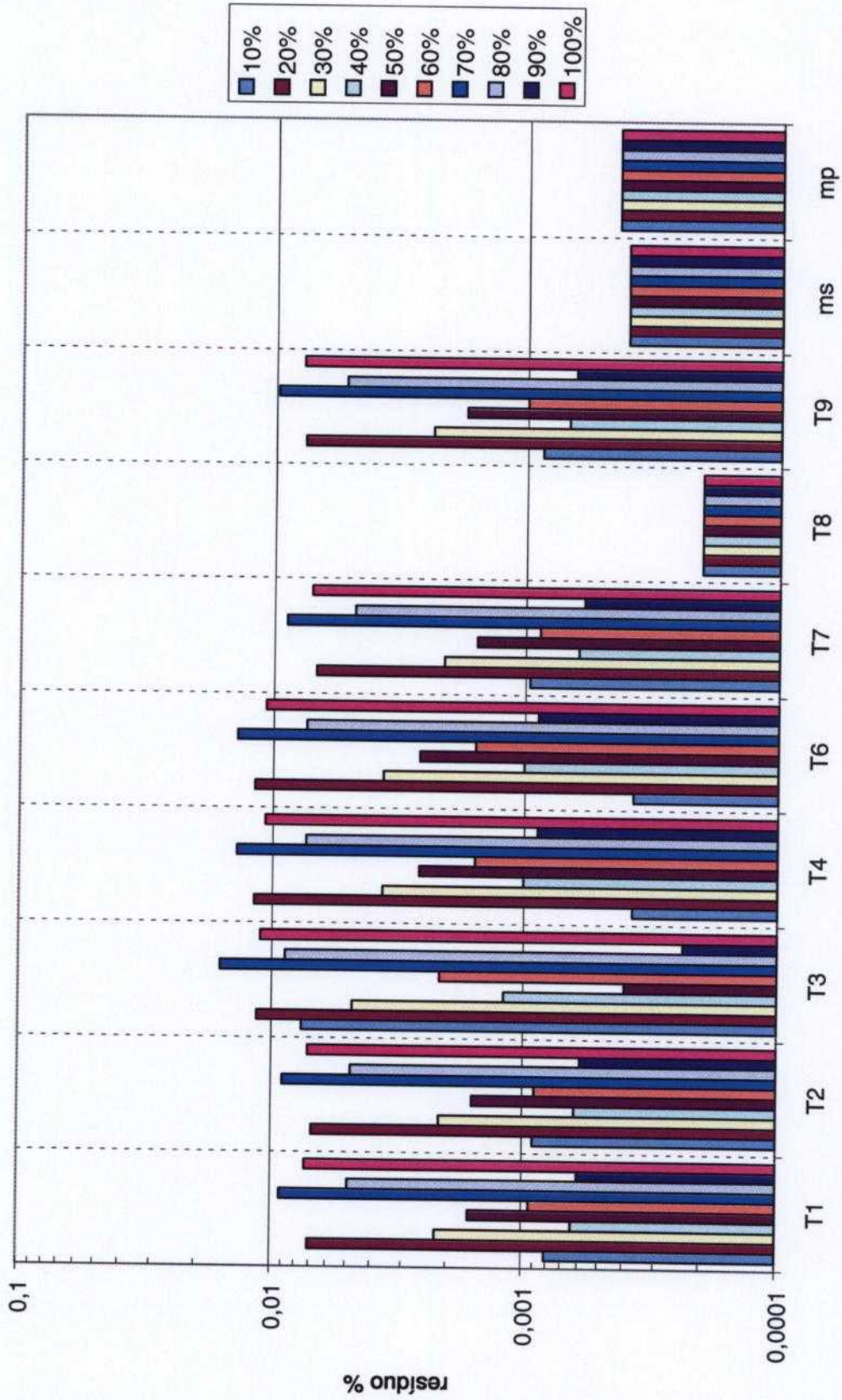


FIGURA 24. Mapa de Resíduos. Resíduos obtidos na monitoração de dados sem ruído gerados pelo modelo teórico do reator IEA-R1.

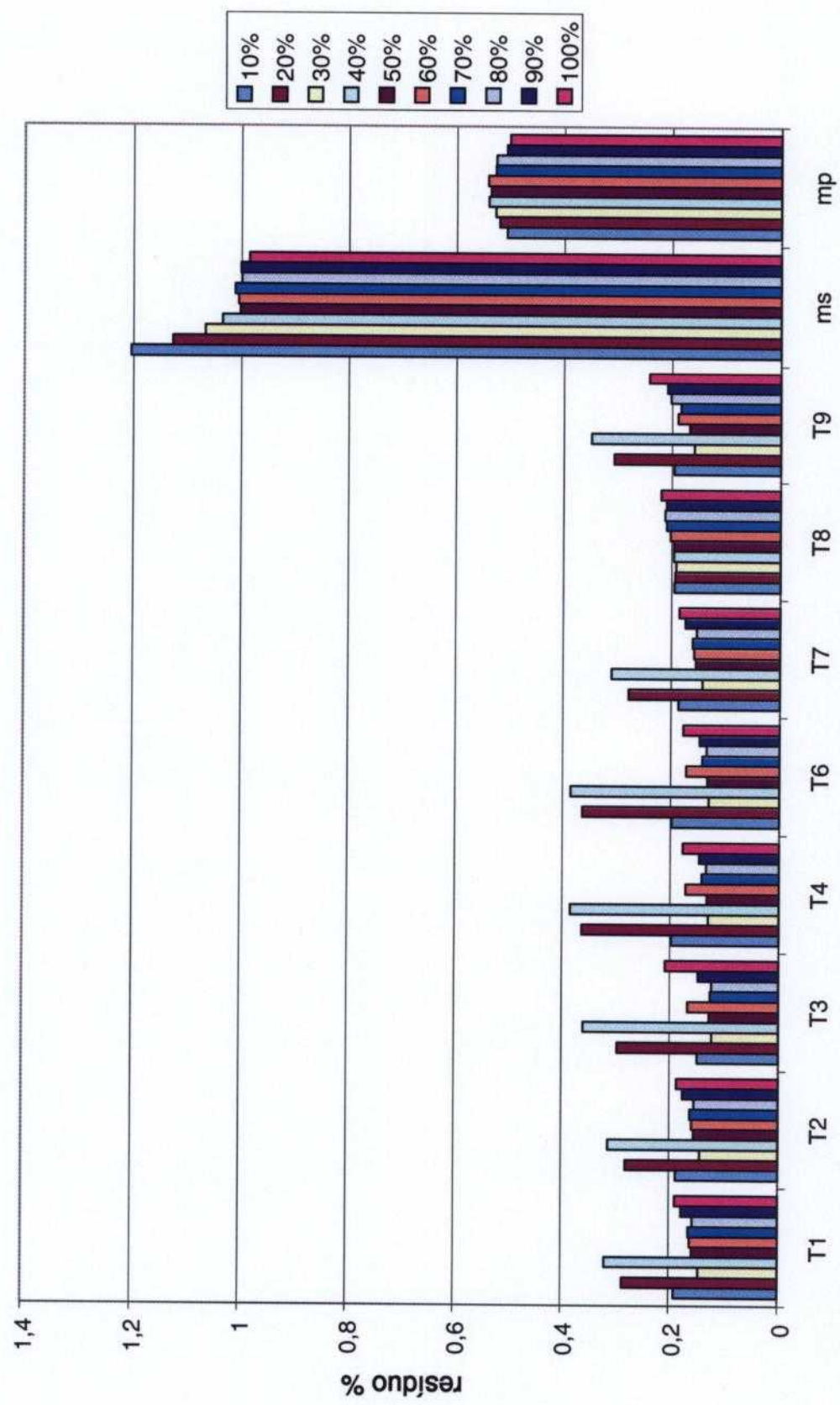


FIGURA 25. Mapa de Resíduos. Resíduos obtidos na monitoração de dados gerados pelo modelo teórico do reator IEA-R1. Temperaturas: ruído de 0,4%; vazão no secundário (ms), ruído de 2% e vazão no primário (mp) ruído de 1%.

Embora os valores de RMIN e resíduo sejam calculados de forma diferente, pode-se fazer uma comparação entre eles. RMIN é o mínimo valor de r_j calculado pela equação (9) e fornece uma medida do menor desvio médio quadrático obtido durante a fase de ajuste do modelo GMDH, enquanto que o resíduo é calculado pela equação (21) e fornece o desvio percentual entre o valor lido e o valor estimado pelo modelo GMDH.

Observando-se o gráfico da Figura 24 tem-se que os valores de resíduos para as variáveis constantes T8, ms e mp são iguais aos valores de RMIN obtidos no modelo GMDH (Tabela 6). Considerando todas as variáveis, o valor máximo de resíduo encontrado foi de 0,016%, que é um valor da mesma ordem de grandeza dos valores de RMIN obtidos no modelo GMDH para dados sem ruído.

No caso da monitoração de dados com ruído, os valores de resíduos apresentados no gráfico da Figura 25 são maiores do que os valores de RMIN obtidos no modelo GMDH (Tabela 7) porque foram colocados no gráfico os valores máximos de resíduos obtidos na monitoração. Os valores de resíduos das vazões são maiores do que os resíduos das temperaturas porque os ruídos são maiores. Os valores máximos de resíduos foram 0,38% para as variáveis de temperatura, 1,2% para a vazão no circuito secundário e 0,54% para a vazão do circuito primário. Esses valores são proporcionais aos valores de ruído das variáveis, que são: temperaturas: 0,4%; vazão no secundário (ms), 2% e vazão no primário (mp) 1%. Não se observou nenhuma influência da potência de operação no valor do resíduo.

7.2.3 Monitoração de dados com falhas

O modelo teórico do reator de pesquisas IEA-R1 foi utilizado para gerar dados de operação normal e também dados com falha.

Nesse estudo a falha foi considerada como sendo um aumento de 10% no valor médio da variável.

Foram gerados arquivos de dados com falhas em cada uma das variáveis do modelo, para as 10 potências de operação, resultando 100 arquivos de dados com falha. Este procedimento foi feito para dados sem ruído e para dados com ruído.

Da mesma forma que foi feito para monitorar os dados de operação normal (sem falha), os dados com falha foram monitorados utilizando-se o Programa Monitora. Como era de se esperar, os valores de resíduos se apresentam diferentes dos valores obtidos nas monitorações anteriores, onde não havia falha nas variáveis. O comportamento

do resíduo vai depender da estrutura do modelo GMDH. Em outras palavras, como o modelo GMDH realiza a estimativa do valor de determinada variável utilizando os valores das demais variáveis, cada condição de falha vai gerar um conjunto de resíduos característicos àquela determinada condição. Este conjunto de resíduos de todas as variáveis é chamado de *mapa de resíduos*. Pode-se considerar o mapa de resíduos como uma assinatura do sistema para determinada condição de operação.

Nas Figuras a seguir tem-se os *mapas de resíduos* para condições de falha em cada uma das variáveis do modelo do reator IEA-R1. Foram considerados dados sem ruído, e em cada gráfico tem-se os valores de resíduos para as 10 potências de operação consideradas. Não se observou nenhuma influência da potência no valor do resíduo.

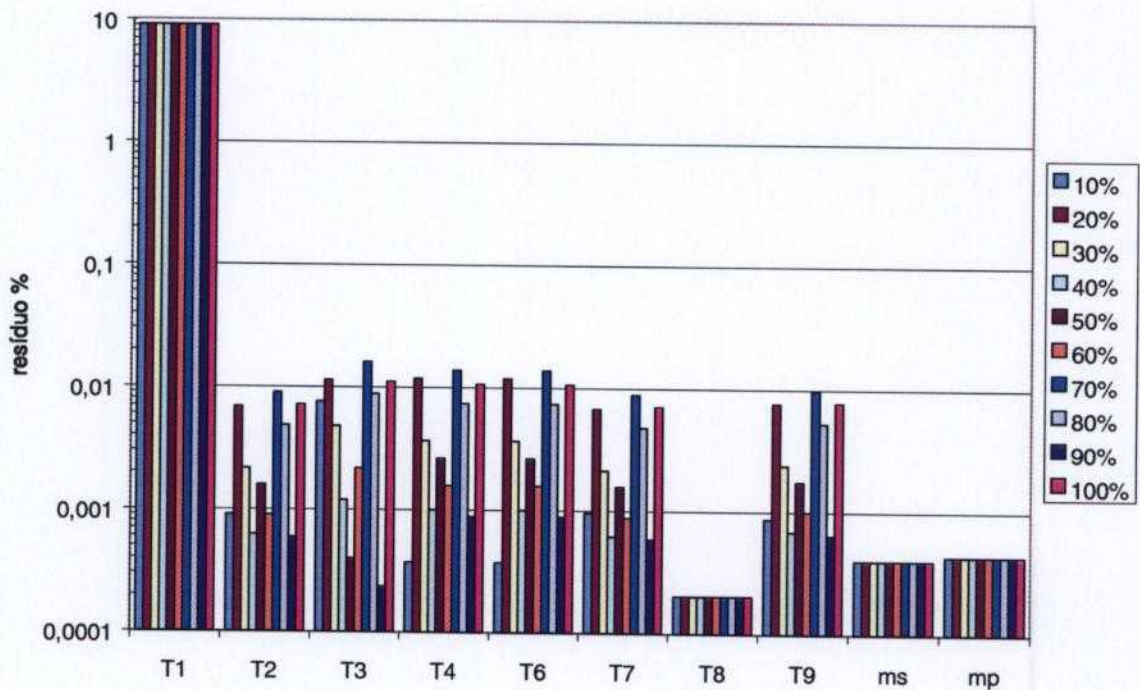


FIGURA 26. Mapa de resíduos para condição de falha em T1.

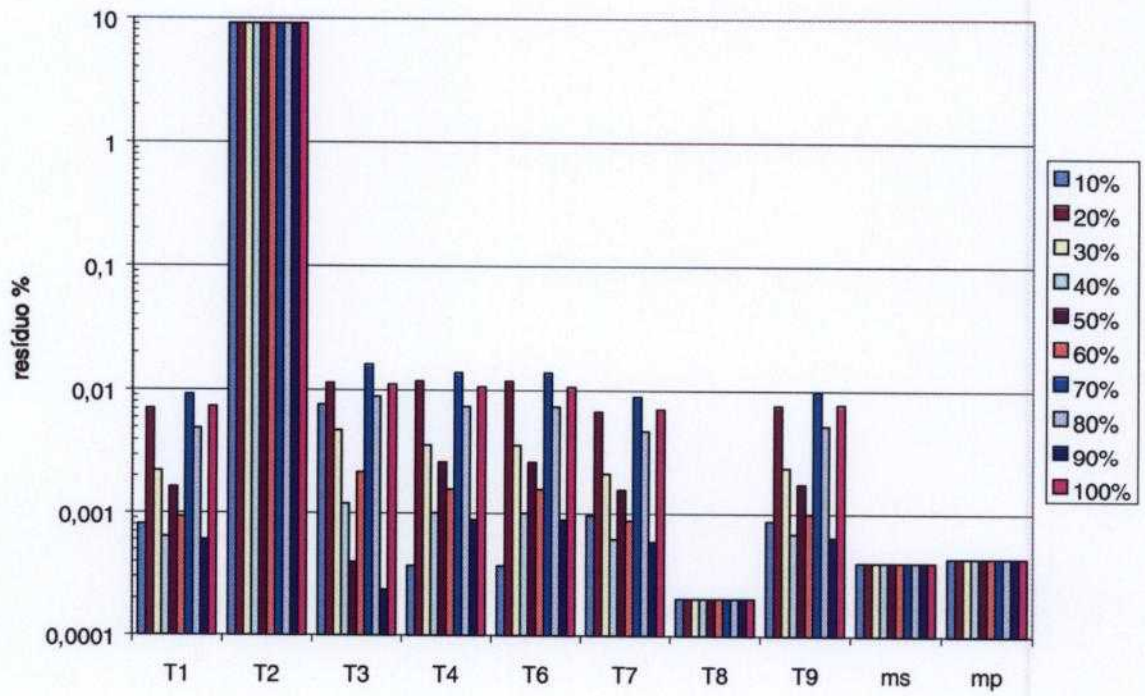


FIGURA 27. Mapa de resíduos para condição de falha em T2.

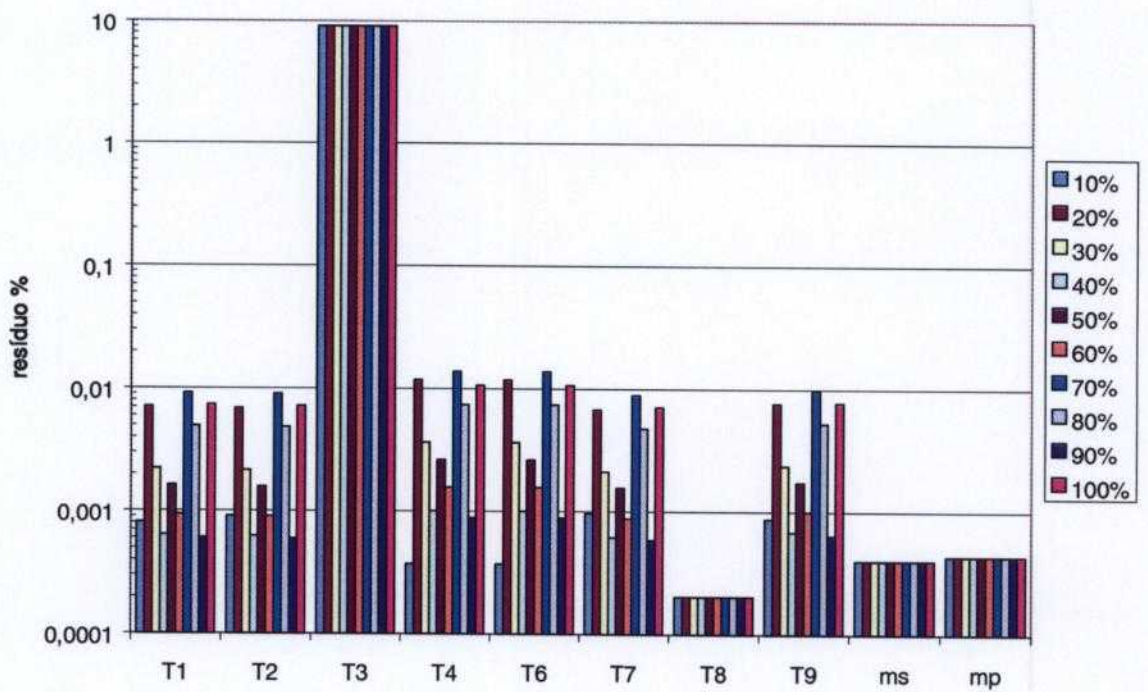


FIGURA 28. Mapa de resíduos para condição de falha em T3.

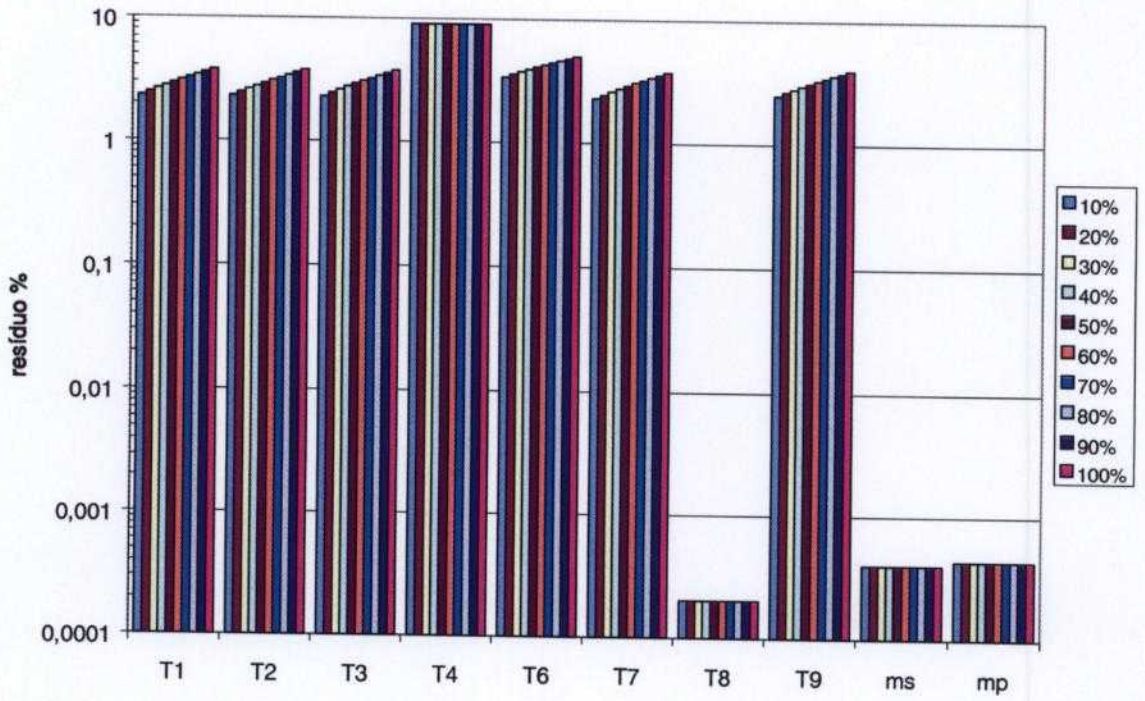


FIGURA 29. Mapa de resíduos para condição de falha em T4.

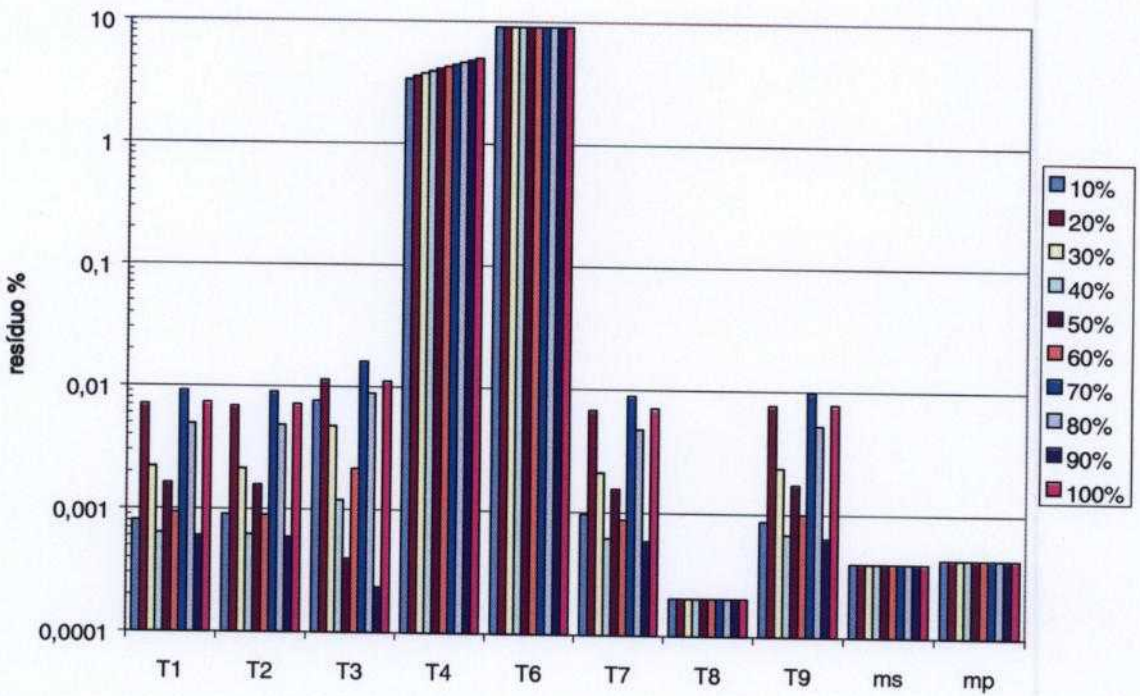


FIGURA 30. Mapa de resíduos para condição de falha em T6.

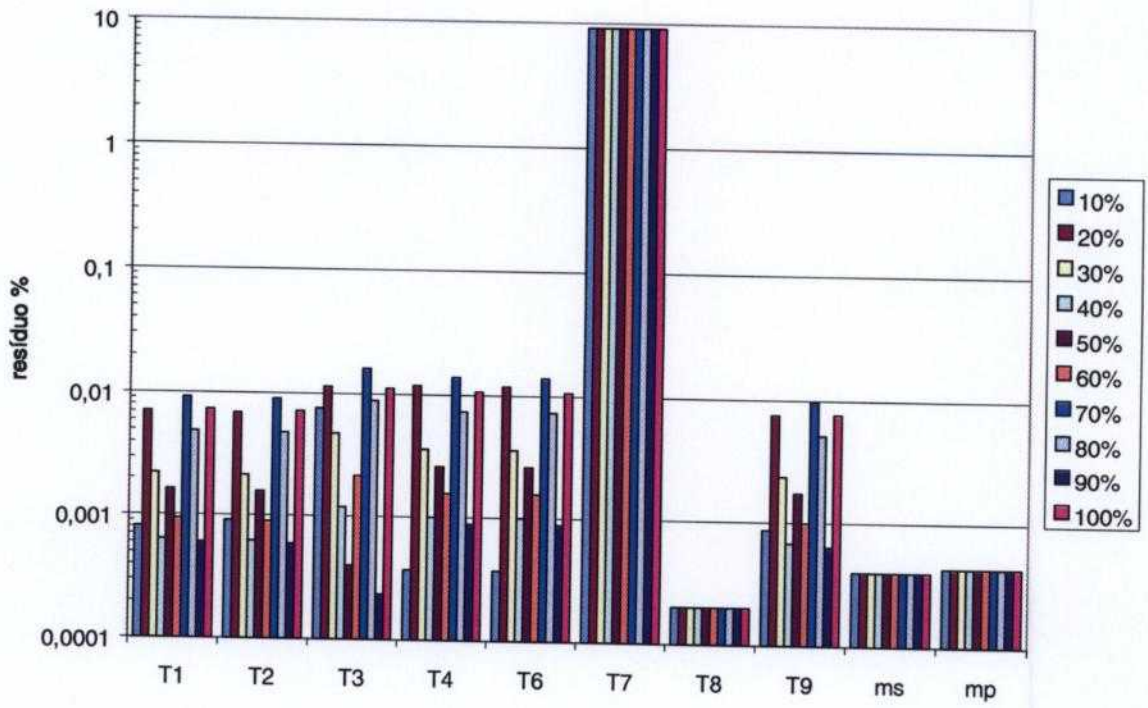


FIGURA 31. Mapa de resíduos para condição de falha em T7.

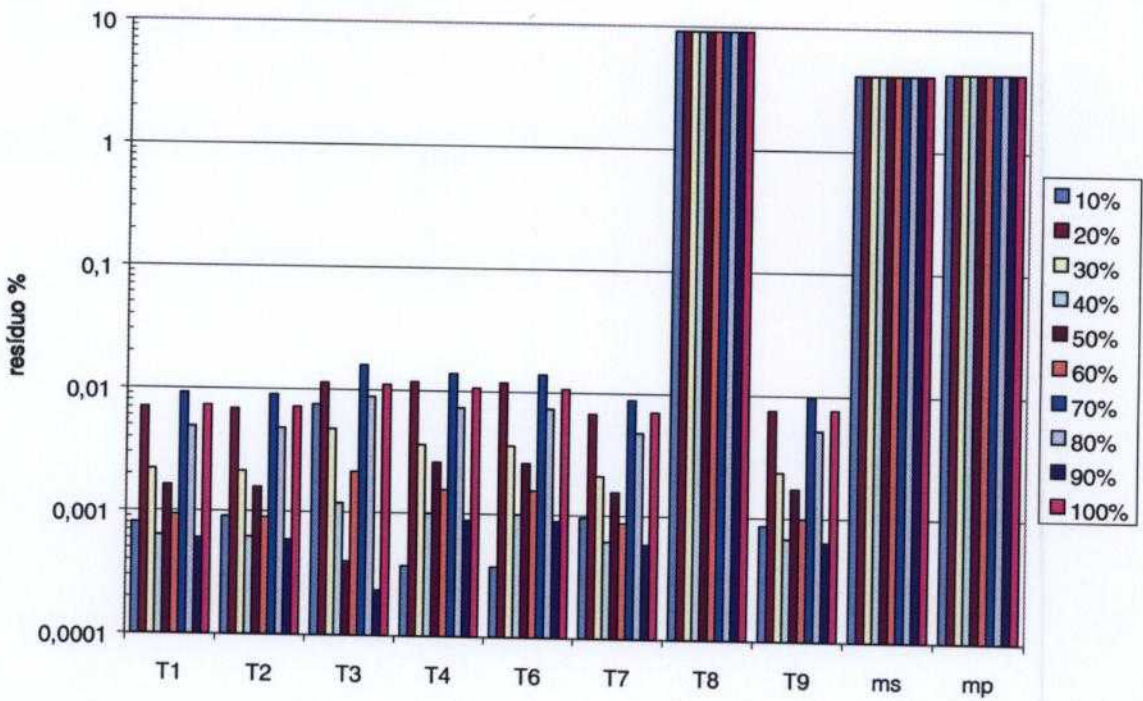


FIGURA 32. Mapa de resíduos para condição de falha em T8.

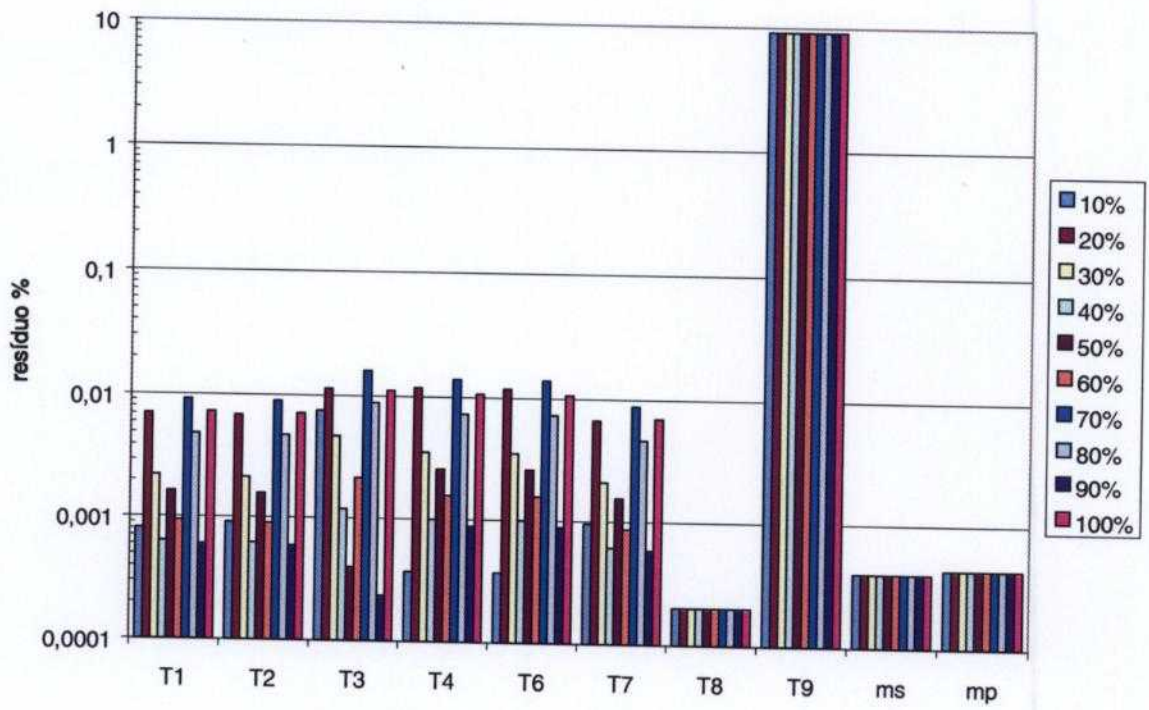


FIGURA 33. Mapa de resíduos para condição de falha em T9.

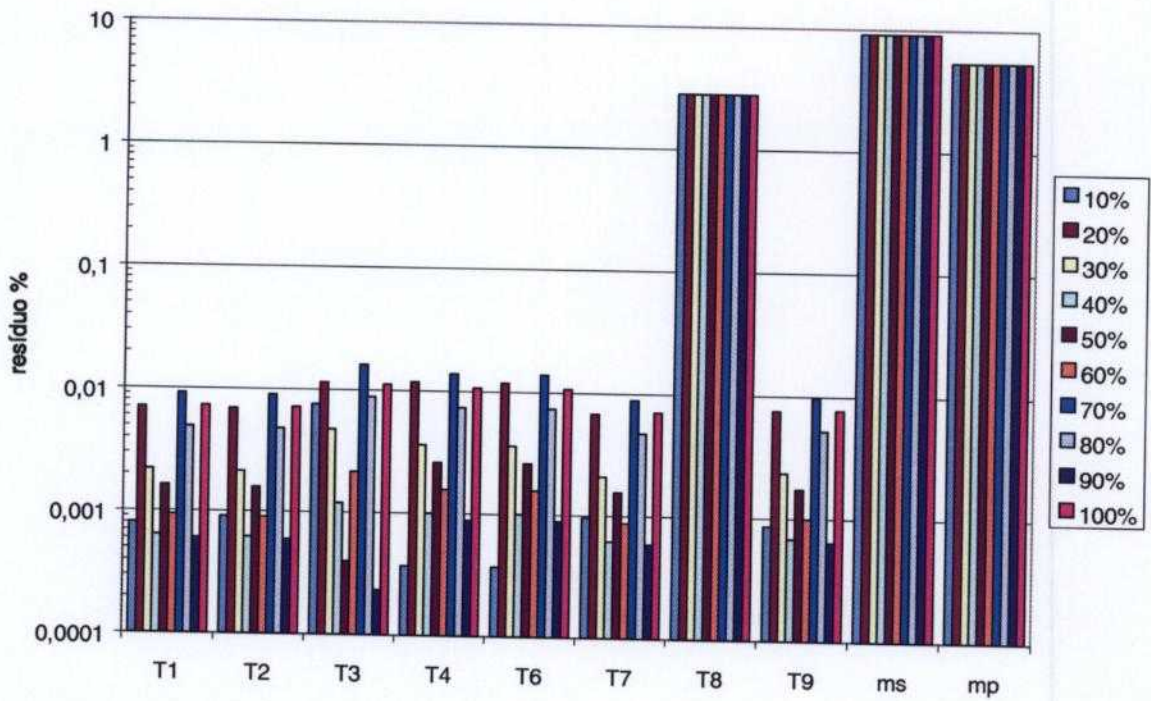


FIGURA 34. Mapa de resíduos para condição de falha em ms.

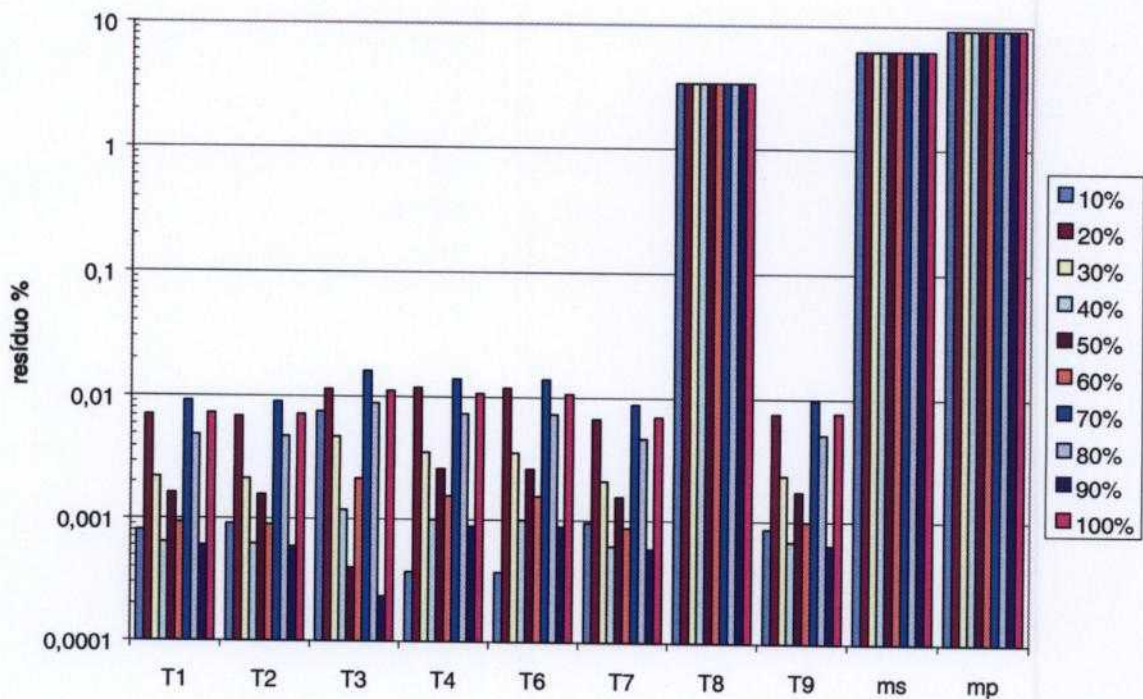


FIGURA 35. Mapa de resíduos para condição de falha em mp.

Foram monitorados dados que contêm valores conhecidos de falhas, e o resultado da monitoração destes dados gerou um conjunto de mapas de resíduos para cada condição de falha estabelecida. O valor máximo de resíduo obtido na monitoração de dados com falha foi de 9%. Esse valor corresponde à variável com falha, e os resíduos obtidos nas demais variáveis são diferentes e dependem do modelo GMDH.

Nos casos de falha em T8, ms e mp, os mapas de resíduos são muito parecidos. Porém, é possível identificar qual das três variáveis é a variável com falha, pois o valor máximo de 9% do resíduo corresponde à variável com falha (note-se que os gráficos estão em escala logarítmica).

Foi construída uma interface utilizando a ferramenta GUIDE do Matlab onde foram incorporadas as regras do Sistema de Diagnóstico desenvolvido. Utilizando essa interface, foi feita a monitoração de todos os dados com todas as potências e possíveis falhas. Na Figura 36 tem-se a interface, onde há uma lista das variáveis do modelo, e uma lista das 10 potências de operação (em %). Seleciona-se um elemento de cada lista e ao executar a função *monitorar*, o programa carrega o arquivo de dados selecionado, estima as variáveis do modelo GMDH, e faz o diagnóstico de acordo com o valor do resíduo calculado. O resultado é mostrado em uma caixa de edição de texto.

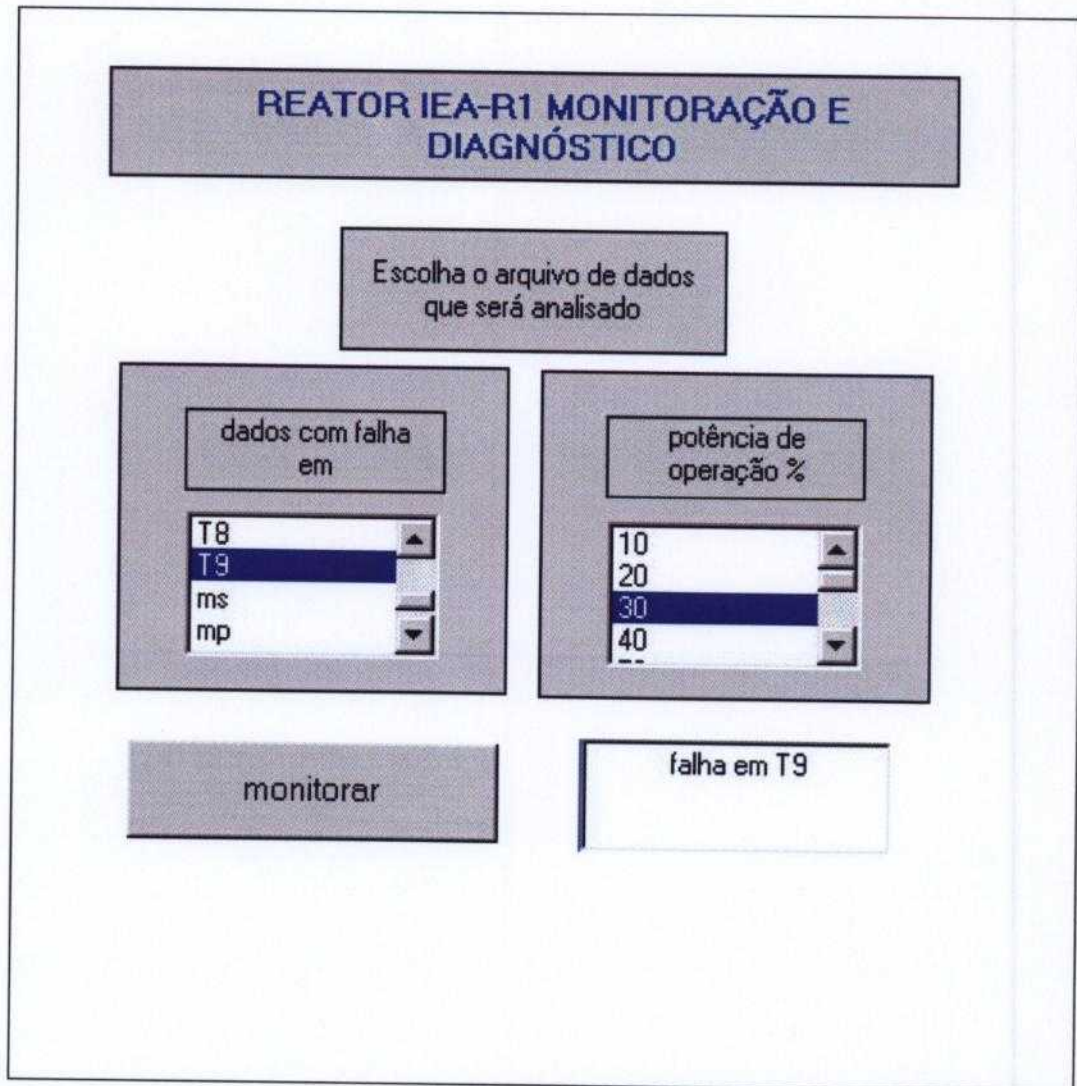


FIGURA 36. Interface desenvolvida para monitoração e diagnóstico dos dados gerados pelo modelo teórico do reator IEA-R1.

O sistema de diagnóstico resultante será melhor quanto maior o número de informações que o alimentam. Ou seja, quanto maior o número de condições conhecidas, tanto para operação normal quanto para condições de falha, mais eficiente será o desempenho do sistema desenvolvido. No caso mostrado, foram consideradas 10 condições de operação de potência nuclear variando de 10 a 100%. As situações de falha foram determinadas para cada uma das variáveis do modelo, em todas as condições de operação. O valor da falha foi estabelecido como sendo uma variação de 10% do valor médio da variável. Esse sistema pode ser expandido para várias outras situações, como por exemplo, considerar falhas de intensidade menores do que 10%, ou considerar outros critérios para falhas. De acordo com os valores de resíduos obtidos na monitoração dessas variáveis com falha, são adicionadas novas regras ao sistema de diagnóstico.

Por se tratar de um modelo teórico, as facilidades de geração de dados são inúmeras. Considerando-se que o sistema de monitoração e diagnóstico desenvolvido para o modelo do reator IEA-R1 mostrou-se adequado para várias condições de operação e falhas consideradas em cada uma de suas variáveis, o próximo passo é aplicar a metodologia desenvolvida para os dados de operação.

7.3 Resultados com dados de operação

O primeiro passo para estabelecer o sistema de monitoração e diagnóstico do reator de pesquisas do Ipen IEA-R1 é definir qual será a base de dados. No modelo teórico do reator foram considerados 10 valores de potência de operação, variando de 10 a 100%. No caso de se considerar os dados de operação, deve-se observar, porém, que o reator opera a um valor fixo de potência. Desde a sua inauguração em 1957 o reator de pesquisas do Ipen foi operado a 2 MW de potência, e a partir de 1997 sofreu um processo de modernização para poder operar a níveis mais altos de potência. Atualmente, (setembro de 2005) o reator está operando a 3,5 MW. Durante o ano de 2004, o reator sofreu várias modificações de configuração do núcleo, fornecendo valores de potência diferentes para cada tipo de configuração [23]. Por esse motivo, foi considerado como base de dados um conjunto de dados de operação de Abril de 2004. Durante esse período a potência de operação permaneceu constante no valor de 4,2 MW.

Os dados são obtidos pelo SAD (Sistema de Aquisição de Dados do reator) que adquire e armazena 57 variáveis a cada 30 segundos. A lista das variáveis do SAD, bem como sua descrição estão na Tabela 5 (Capítulo 6.3.1). Algumas dessas variáveis não são relevantes para o sistema de monitoração e diagnóstico, como por exemplo, temperatura na carcaça de motores, e por esse motivo não foram incluídas no desenvolvimento do sistema. Além disso, pode-se separar as variáveis em dois grupos: as variáveis de processo (temperatura e vazão) e as variáveis nucleares (potência nuclear, posição de barras e taxas de dose). Foram desenvolvidos três modelos GMDH utilizando os dados de operação: o primeiro modelo utilizou as mesmas variáveis do modelo teórico do reator, temperatura e vazão, num total de 10 variáveis, e foi chamado de modelo 1. O segundo modelo foi desenvolvido considerando-se algumas variáveis nucleares e duas variáveis de temperatura, num total de 9 variáveis, e foi chamado de modelo 2. Finalmente, foi desenvolvido o terceiro modelo GMDH, considerando todas as variáveis possíveis. Apenas algumas foram excluídas por serem consideradas não relevantes ao sistema de monitoração. O terceiro modelo GMDH possui 38 variáveis, e foi chamado de modelo 3.

7.3.1 Modelo 1

O primeiro modelo utilizou as mesmas variáveis do modelo teórico do reator IEA-R1: T1, T2, T3, T4, T6, T7, T8, T9, ms e mp. No modelo teórico do reator foi considerado apenas um circuito de refrigeração. O reator IEA-R1 possui dois circuitos de refrigeração: A e B que operam de forma alternada, ou seja, ou está em operação o trocador de calor A ou o trocador de calor B. Em Abril de 2004 foi utilizado o trocador B, e portanto as temperaturas de saída do trocador de calor do lado primário, e temperatura de entrada e saída do trocador de calor do lado secundário são, respectivamente, T10, T11 e T12 que correspondem às temperaturas T7, T8 e T9 do modelo teórico do reator.

Utilizando a base de dados de Abril de 2004, foram geradas as equações do modelo GMDH, obtendo-se os resultados das estimativas das variáveis do reator. Os valores de RMIN e geração correspondente são mostrados na Tabela 8.

TABELA 8. RMIN e geração correspondente para dados do modelo 1.

variável	RMIN	geração
T1	0,0027	3
T2	0,0027	2
T3	0,0025	3
T4	0,0021	4
T6	0,0021	4
T10	0,0026	5
T11	0,0044	3
T12	0,0026	3
ms	0,0025	5
mp	0,0029	4

Embora as variáveis do modelo 1 sejam as mesmas variáveis do modelo teórico do reator IEA-R1, as condições de operação escolhidas para compor a base de dados foram diferentes. Para o modelo teórico foram consideradas 10 potências de operação, enquanto que para os dados de operação foi considerado apenas um valor de potência. Porém, as variáveis de temperatura apresentam uma flutuação ao longo do período de operação do reator. Essa flutuação existe porque o sistema de refrigeração do secundário do trocador de

calor é feito através de torres de refrigeração situadas na parte externa ao prédio do reator e a temperatura ambiente sofre variações ao longo do período de operação do reator. Essa flutuação é propagada para as demais variáveis de temperatura.

Com a finalidade de ilustrar os resultados de monitoração dos dados de operação do reator IEA-R1, foi feito o gráfico mostrado na Figura 37 onde tem-se a comparação entre o valor lido da variável T1 e seu valor estimado pelo modelo GMDH. As demais variáveis apresentam comportamento semelhante.

Na Figura 38 tem-se os valores de resíduos em porcentagem calculados de acordo com a equação (21).

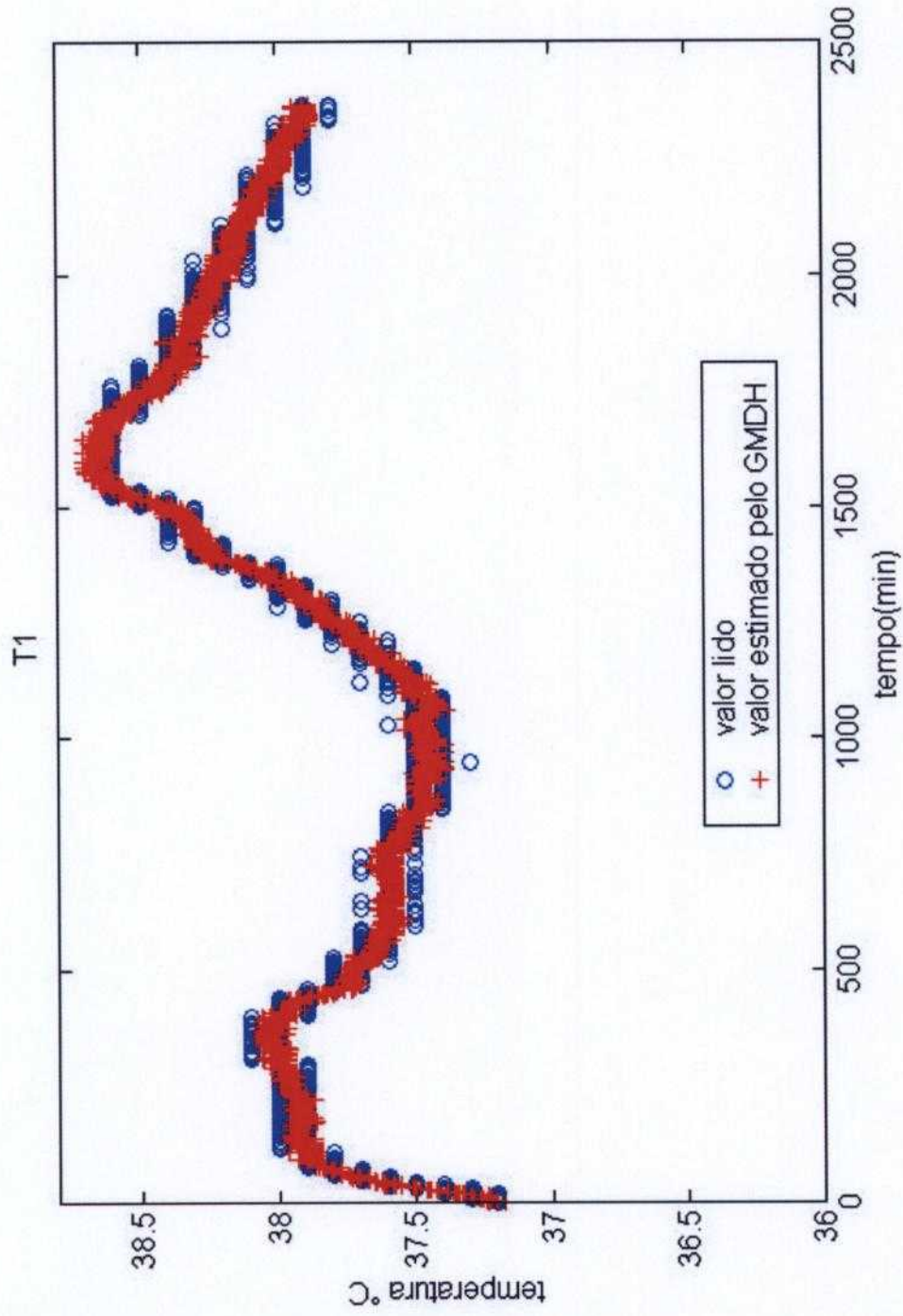


FIGURA 37. Comparação entre o valor lido e valor estimado pelo GMDH para temperatura T1. Dados de operação do reator IEA-R1.

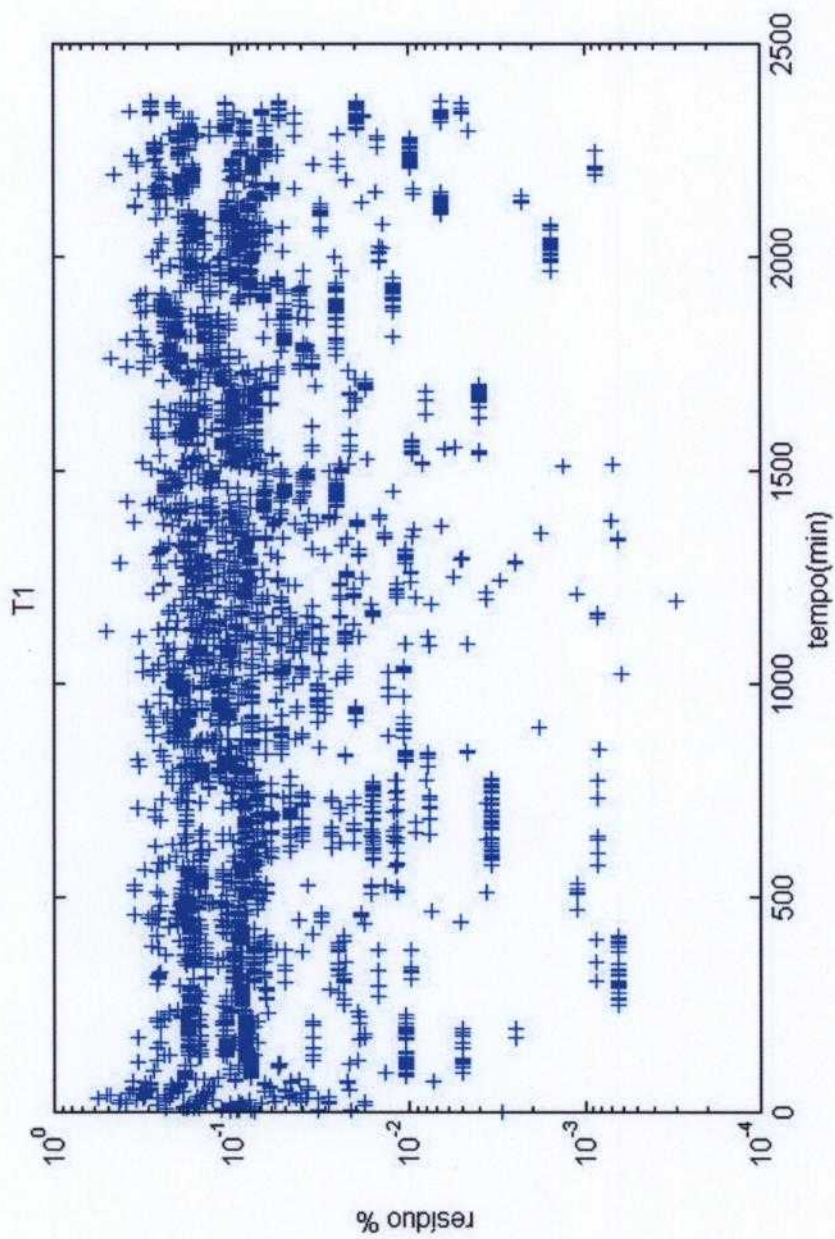


FIGURA 38. Resíduos da variável T1. Dados de operação do reator IEA-R1.

Observando-se a Figura 37, vê-se que para variações lentas no tempo o modelo acompanhou essas variações. Em outras palavras, os valores das variáveis estimadas pelo modelo GMDH são próximos dos valores reais e acompanham as flutuações observadas ao longo do período de operação. Essa é uma observação muito importante, visto que na determinação do modelo não foi levada em consideração nenhuma variação no tempo, ou seja, não foi acrescentado nenhum tipo de cálculo adicional ao convencional, que está estabelecido na literatura como sendo aplicável somente para dados constantes.

Na Figura 39 tem-se os valores de resíduos para as variáveis monitoradas.

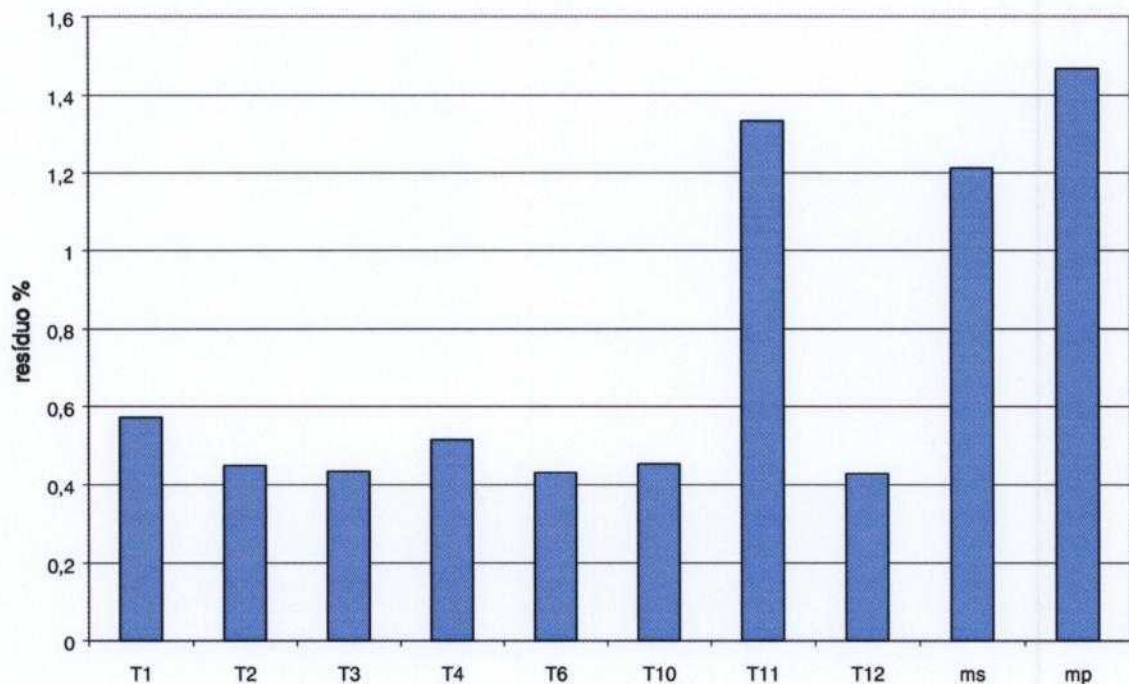


FIGURA 39. Mapa de resíduos para dados de operação do reator IEA-R1. Modelo 1.

Para as temperaturas, o valor máximo de resíduo foi de 0,57%, a menos da variável T11 (temperatura de entrada do circuito secundário do trocador de calor), que apresentou um valor máximo de resíduo de 1,33%. Os valores de resíduos máximos das vazões foram, 1,2% para a vazão do secundário e 1,5% para a vazão do primário.

O próximo passo é fazer a monitoração. Para isso foram utilizados dados de duas outras semanas de operação de Abril de 2004, denominadas de semana 1 e semana 2. A Figura 40 a seguir mostra o resultado da monitoração para a variável T1.

Da mesma forma que foi feito para os dados anteriores, foi calculado o resíduo para as duas outras semanas de operação. Os valores de resíduos da variável T1, em porcentagem, estão mostrados no gráfico da Figura 41.

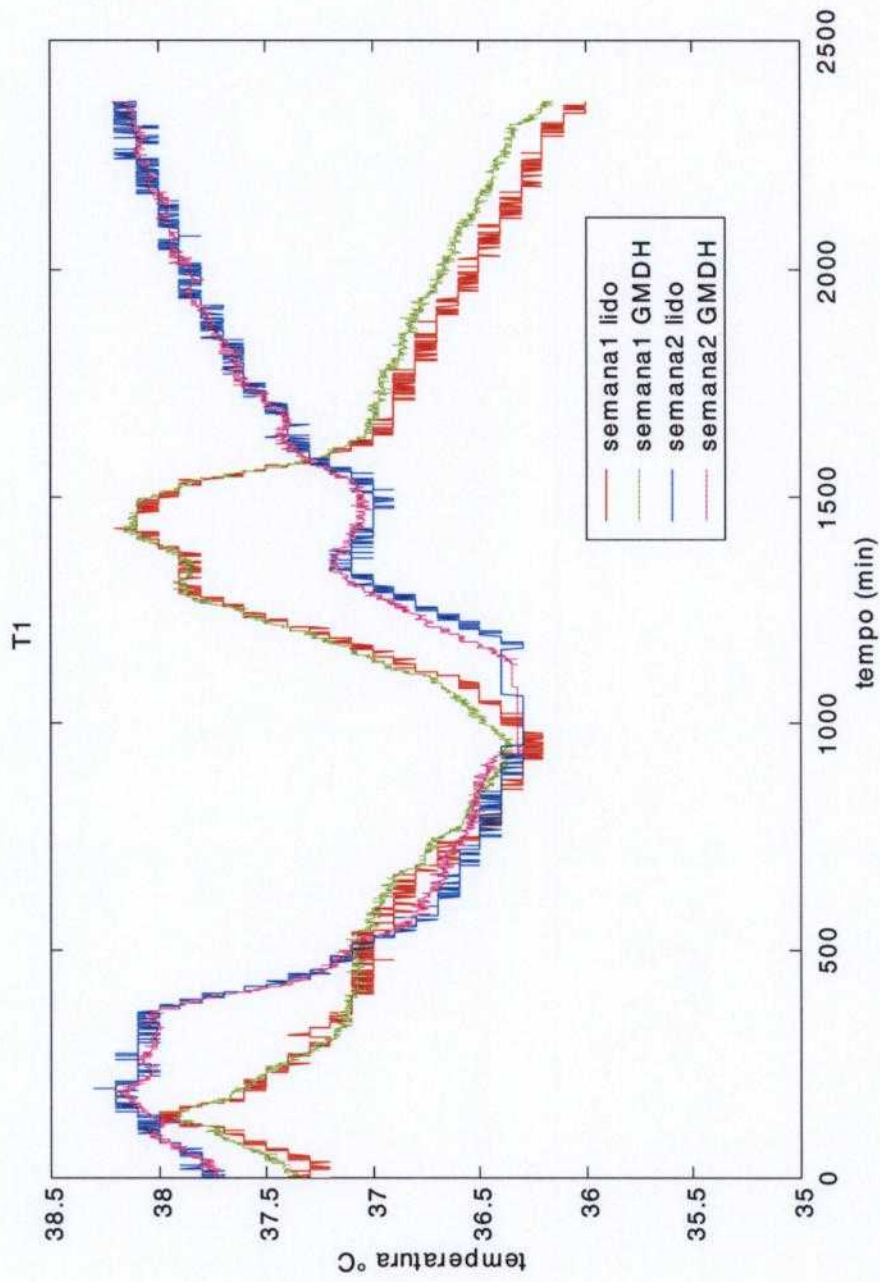


FIGURA 40. Comparação entre o valor lido e valor estimado pelo GMDH para temperatura T1. Dados de operação do reator IEA-R1.

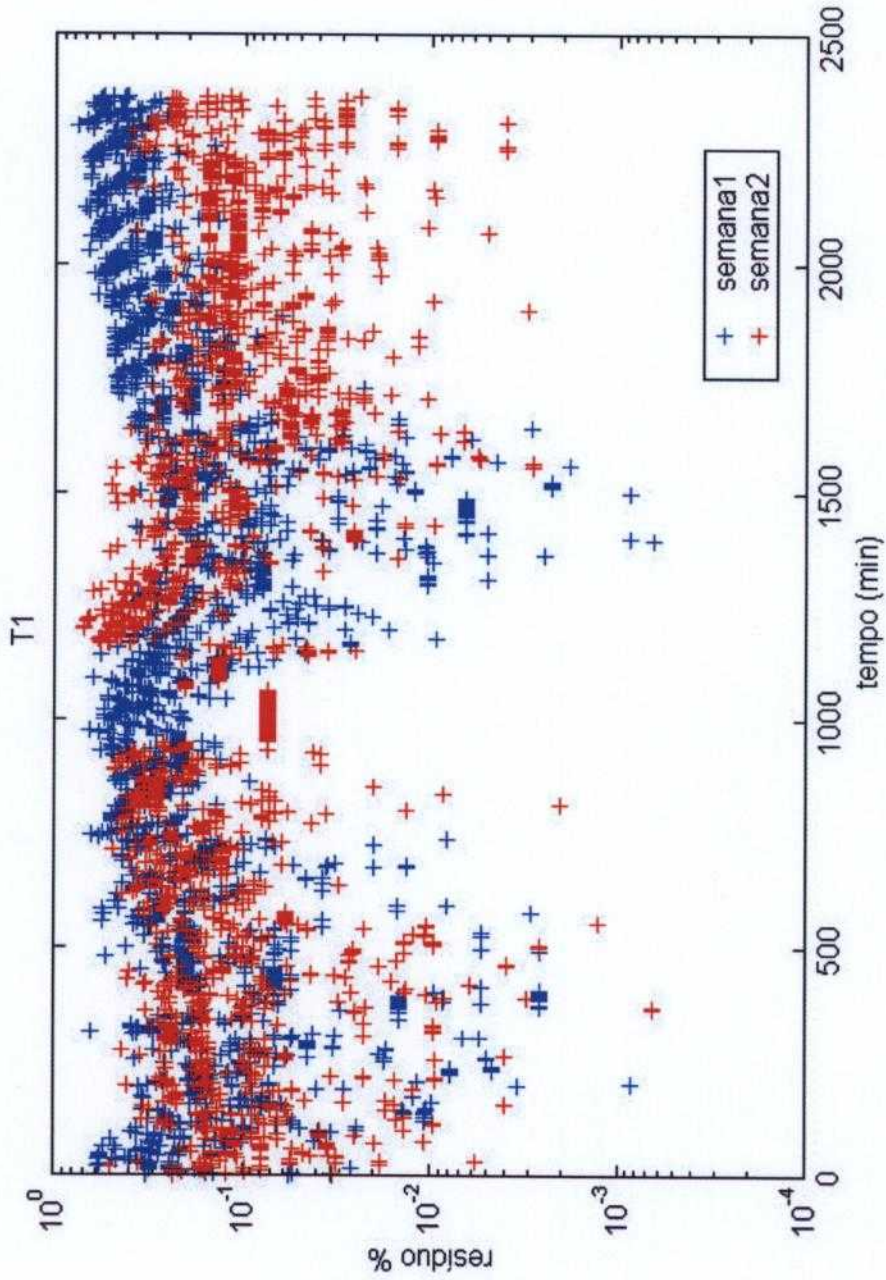


FIGURA 41. Resíduos da variável T1. Dados de operação do reator IEA-R1.

Pode-se observar que a estrutura do modelo GMDH determinada para a base de dados ao ser aplicada a dados de outras semanas de operação mostrou bons resultados. Embora as condições de potência de operação tenham sido as mesmas da base de dados, ou seja, potência de operação de 4,2 MW, as flutuações ao longo do período de operação são diferentes. Como o modelo GMDH é formado pela relação entre as variáveis, estas relações se mantiveram, e o valor das variáveis estimadas pelo modelo GMDH foi próximo do valor lido, apresentando valores de resíduos menores do que 0,8% para a temperatura T1.

O mesmo procedimento foi realizado para as demais variáveis. Na Figura 42 tem-se os valores de resíduos máximos encontrados na monitoração das variáveis de operação.

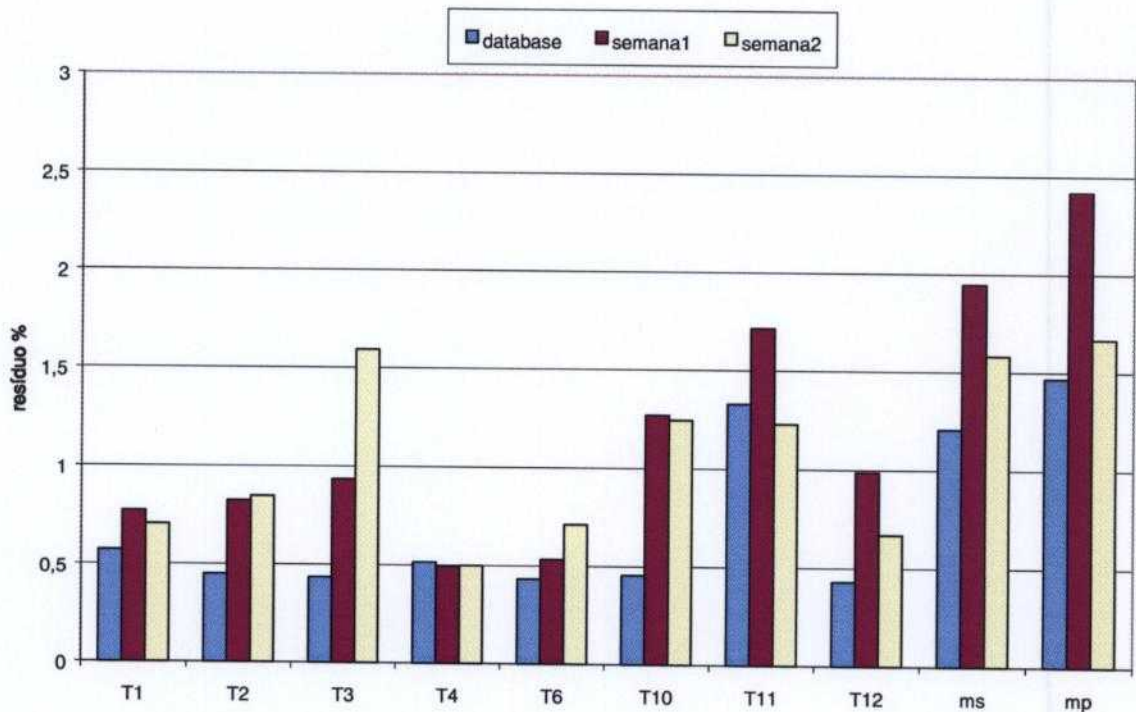


FIGURA 42. Mapa de resíduos para dados de operação do reator IEA-R1. Base de dados, semana 1 e semana 2. Modelo 1.

7.3.2 Modelo 2

Como foi dito no início deste capítulo, o modelo 1 considerou as mesmas variáveis do modelo teórico do reator IEA-R1, ou seja, as variáveis de temperatura e vazão. Porém para a operação de um reator nuclear também é muito importante monitorar as variáveis nucleares, ou seja, potência nuclear, posição de barras e os valores de taxa de dose.

No caso das variáveis de processo, as equações de transferência de calor são conhecidas e relativamente simples de ser obtidas. Isso já não ocorre no caso das variáveis nucleares, onde os valores de radiação ao longo dos caminhos percorrido desde sua emissão no núcleo do reator, passando pelas estruturas dos elementos combustíveis, piscina, saguão do reator, etc., até atingir os detectores de radiação são mais complexos.

O modelo 2 foi feito para um novo conjunto de variáveis do SAD incluindo algumas variáveis nucleares. As variáveis do modelo 2 são dadas na Tabela 9.

TABELA 9. Descrição das variáveis utilizadas no modelo 2.

N2	% de potência (canal de segurança 1) [%]
Z1	Posição da barra de controle [0 a 1000 mm]
Z2	Posição da barra de segurança 1 [0 a 999 mm]
Z3	Posição da barra de segurança 2 [0 a 999 mm]
R1	Ponte de sustentação do núcleo, lado esquerdo [mR/h]
R2	Ponte de sustentação do núcleo, lado direito [mR/h]
T1	Temperatura na superfície da piscina [°C]
T3	Temperatura sobre o núcleo do reator [°C]
T4	Temperatura na entrada do tanque de decaimento [°C]

As temperaturas T1, T3 e T4 permaneceram no novo modelo por serem consideradas variáveis de processo relevantes.

O procedimento para estabelecer o modelo GMDH foi repetido para as novas variáveis. Os resultados são mostrados na Tabela a seguir.

TABELA 10. RMIN e geração correspondente para as variáveis do modelo 2.

variável	RMIN	geração
N2	0,0075	4
Z1	0,0162	5
Z2	5,7562 e-004	1
Z3	5,8597 e-004	1
R1	0,0308	5
R2	0,0276	5
T1	0,0028	2
T3	0,0028	2
T4	0,0025	5

Os valores de RMIN para as variáveis de temperatura são próximos aos valores de RMIN obtidos no modelo 1 e os valores de RMIN para as variáveis Z2 e Z3, posição de barras de segurança, foram da ordem de 10^{-4} , menores do que os valores encontrados para as variáveis de temperatura. Para as variáveis de taxa de dose, R1 e R2, os valores de RMIN são maiores, da ordem de 10^{-2} .

Com a finalidade de ilustrar os resultados do novo modelo desenvolvido, tem-se no gráfico da Figura 43 a comparação entre o valor da taxa de dose sobre a ponte de sustentação do núcleo, variável R1, e seu valor estimado pelo modelo GMDH. Na Figura 44 tem-se o resíduo correspondente.

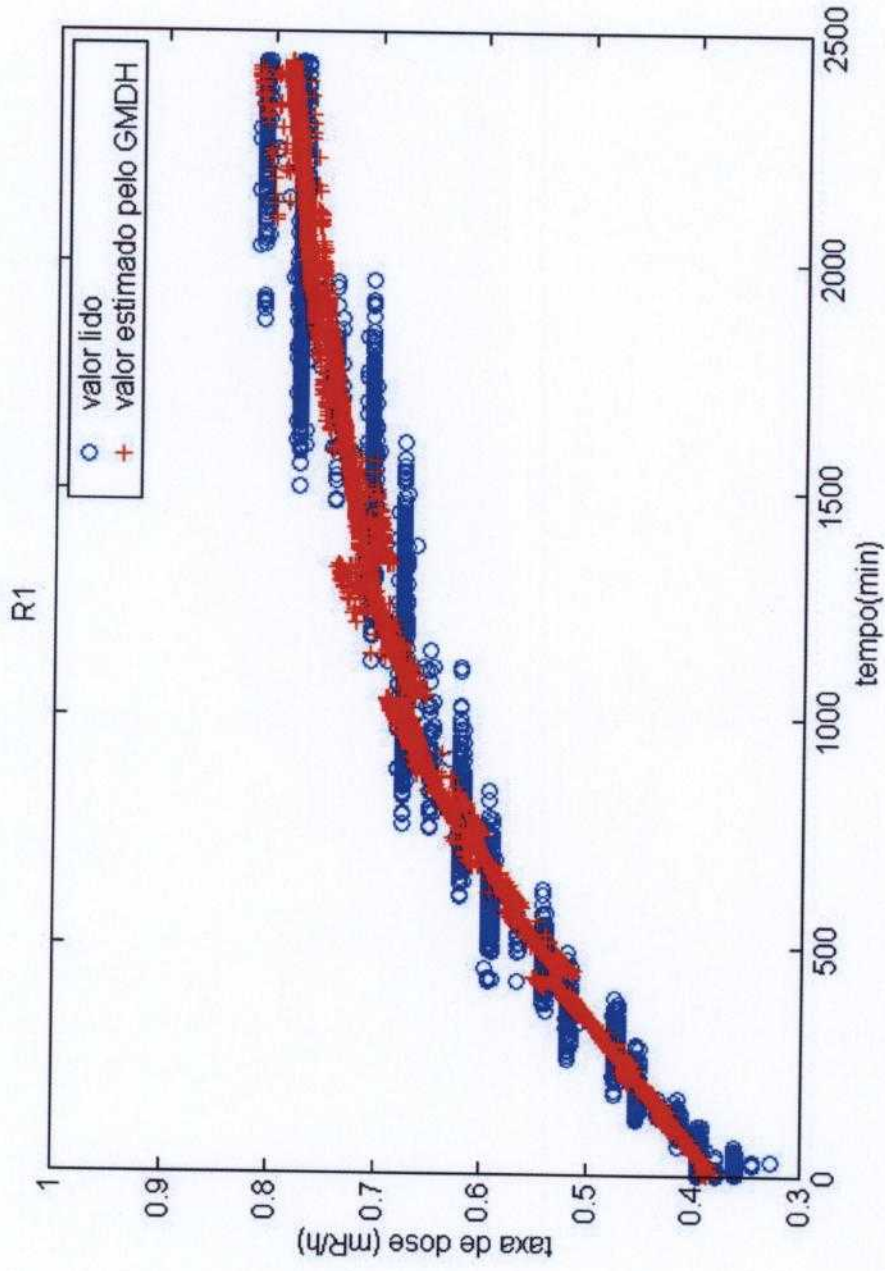


FIGURA 43. Comparação entre o valor lido e valor estimado pelo GMDH para R1. Dados de operação do reator IEA-R1.

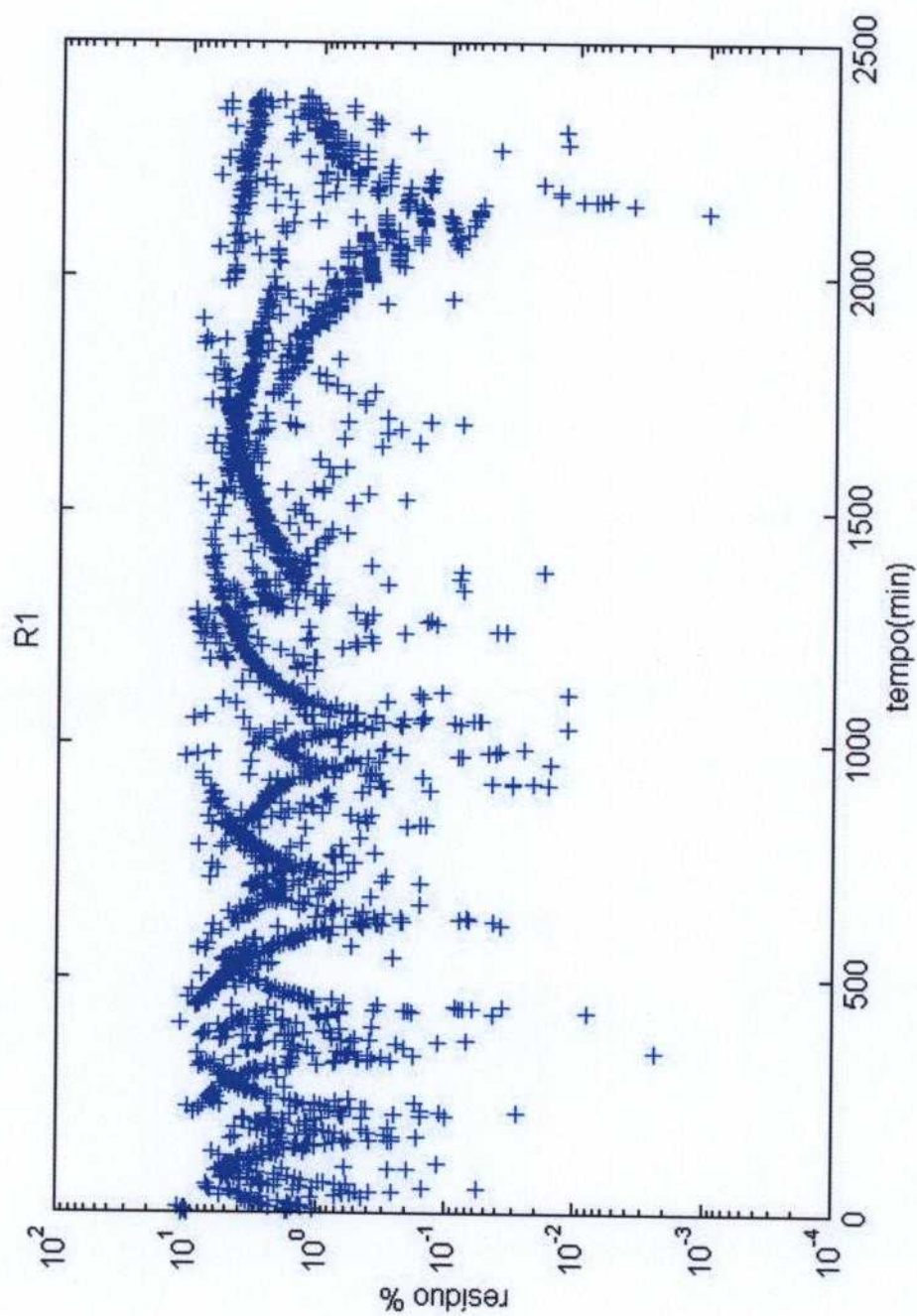


FIGURA 44. Resíduos da variável R1. Dados de operação do reator IEA-R1.

A monitoração das demais variáveis apresentou resultado semelhante. Da mesma forma que no caso dos resultados de monitoração do modelo 1, foram monitorados os dados das duas outras semanas de operação de Abril de 2004. Na Figura 45 tem-se os resultados dessa monitoração.

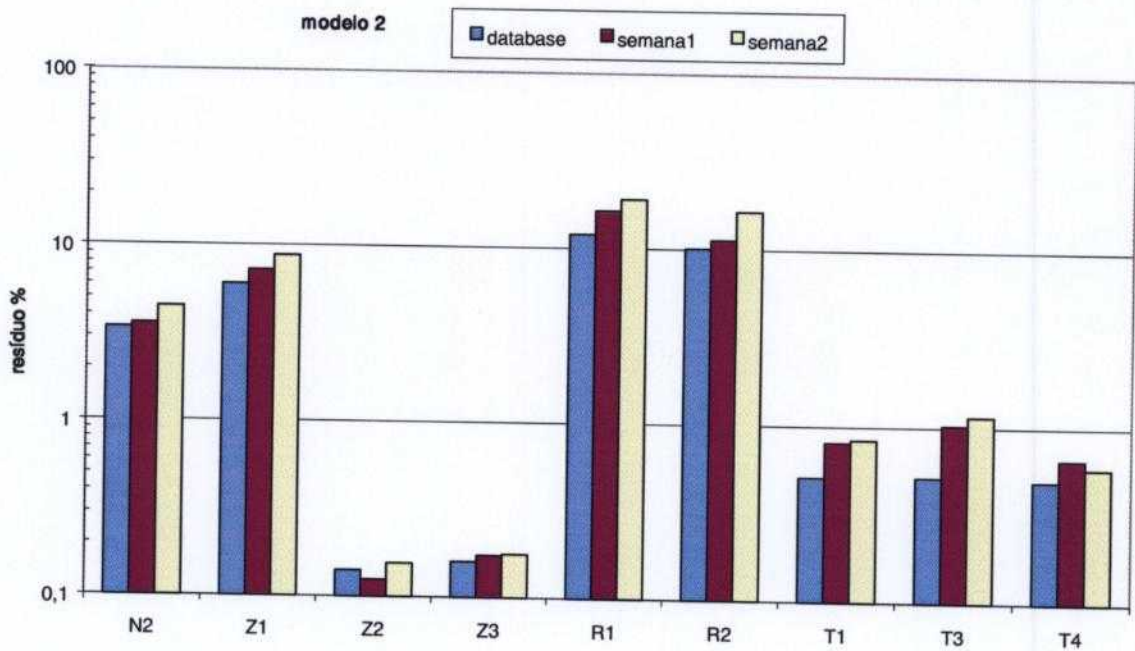


FIGURA 45. Mapa de resíduos para dados de operação do reator IEA-R1. Modelo 2.

Para as variáveis temperaturas, os valores de resíduos foram próximos aos valores obtidos pelo modelo anterior, obtendo-se um valor máximo de resíduo de temperatura de 1,16%. Para Z2 e Z3, os valores máximos de resíduo foram menores do que 0,2%. Os valores de resíduos das demais variáveis nucleares são maiores, sendo que para a variável R1 o valor máximo chegou a 19%.

7.3.3 Modelo 3

Foi feito um novo modelo GMDH para um novo conjunto de variáveis do SAD incluindo agora o maior número possível das variáveis do SAD. O reator IEA-R1 possui dois circuitos de refrigeração: A e B que operam de forma alternada, ou seja, ou está em operação o trocador de calor A ou o trocador de calor B, bem como a torre de refrigeração A ou a torre de refrigeração B. Desta forma, para o sistema de monitoração devem ser consideradas apenas as variáveis de temperaturas e vazão relacionadas ao circuito de refrigeração que está sendo utilizado. As variáveis de temperatura de carcaça de motores e "no-breaks" também não foram incluídas nesse novo modelo, assim como as temperaturas da torre de refrigeração e as medidas de temperatura ambiente. As variáveis escolhidas para fazer parte do terceiro modelo GMDH, totalizando 38 variáveis, são mostradas na Tabela 11 a seguir:

TABELA 11. Descrição das variáveis do modelo 3.

Variáveis nucleares	
Z1	Posição da barra de controle [0 a 1000 mm]
Z2	Posição da barra de segurança 1 [0 a 999 mm]
Z3	Posição da barra de segurança 2 [0 a 999 mm]
Z4	Posição da barra de segurança 3 [0 a 999 mm]
N1	Período [seg]
N2	% de potência (canal de segurança 1) [%]
N3	% de potência (canal de segurança 2) [%]
N4	% de potência (canal de segurança 3) [%]
N5	Potência logarítmica (canal log) [%]
N6	% de potência (canal linear) [%]
N7	% de demanda (modo automático) [%]
N8	Potência do N16 (canal N16) [%]
Variáveis de processo	
F1M3	Vazão do primário [gpm]
F3M3	Vazão do secundário (trocador B) [gpm]
C1	Condutividade da água da piscina após o tratamento [µmho]
C2	Condutividade da água da piscina antes do retratamento [µmho]

Variáveis de monitoração da radiação	
R1M3	Ponte de sustentação do núcleo, lado esquerdo [mR/h]
R2M3	Ponte de sustentação do núcleo, lado direito [mR/h]
R3M3	Parede do prédio do saguão da piscina, face norte [mR/h]
R4M3	Parede da piscina, face sul, sobre o tubo de irradiação nº8 [mR/h]
R5M3	Parede da piscina, face oeste, sobre os tubos de irradiação nº3 e 4 [mR/h]
R6M3	Parede do prédio do reator, face leste, sobre os tubos de armazenamento de material radioativo [mR/h]
R7M3	Poço de coleta de água da piscina (poço SUMP) [mR/h]
R8M3	Sistema de retratamento de água – Coluna de resinas [mR/h]
R9M3	Trocador de calor A [mR/h]
R10M3	Parede ao fundo do porão, encostada ao duto de exaustão entre os trocadores de calor A e B [cps]
R11M3	Sala do ar condicionado, junto ao duto de exaustão de ar do 1º andar [cps]
R12M3	Saguão da piscina, junto ao duto de exaustão de ar [cps]
R13M3	Duto de exaustão de ar da chaminé [cps]
R14M3	Tanque de retenção [cps]
Variáveis de temperatura	
T1	Temperatura na superfície da piscina [°C]
T2	Temperatura a meia altura da piscina [°C]
T3	Temperatura sobre o núcleo do reator [°C]
T4	Temperatura na entrada do tanque de decaimento [°C]
T6	Temperatura na saída do tanque de decaimento [°C]
T10	Temperatura na saída do primário (trocador B) [°C]
T11	Temperatura na entrada do secundário (trocador B) [°C]
T12	Temperatura na saída do secundário (trocador B) [°C]

TABELA 12. RMIN e geração correspondente para as variáveis do modelo 3.

variável	RMIN	geração
N1	0,0122	5
N2	0,0013	1
N3	0,0013	1
N4	0,0013	1
N5	0,0060	2
N6	8,0971 e-004	1
N7	0,0020	1
N8	0,0063	3
Z1	0,0059	10
Z2	8,8062 e-004	1
Z3	8,6855 e-004	1
Z4	0,0356	10
mp	0,0028	3
ms	0,0026	10
C1	0,0069	2
C2	0,0223	4
R1	0,0287	5
R2	0,0276	8
R3	0,0384	7
R4	0,0477	10
R5	0,0881	5
R6	0,0927	10
R7	0,0140	3
R8	0,0483	6
R9	0,0269	5
R10	0,0516	10
R11	0,0271	8
R12	0,0717	5
R13	0,1059	10
R14	0,0895	10
T1	0,0027	2
T2	0,0025	2
T3	0,0024	2
T4	0,0020	7
T6	0,0020	3
T10	0,0025	5
T11	0,0046	3
T12	0,0024	3

Apesar do aumento do número e da complexidade dos dados, o modelo GMDH foi criado e os resultados foram comparáveis aos resultados obtidos nos modelos anteriores, como pode ser visto na Tabela 12.

Da mesma forma que foi feito para os dois modelos anteriores, foi feita a monitoração para a base de dados e para as duas outras semanas de operação. Como o número de variáveis é elevado, os resultados de resíduo máximo das variáveis foram divididos em quatro gráficos, para melhor visualização, mostrados nas Figuras 46 a 49.

As medidas de potência nuclear são feitas por diferentes tipos de sensores de radiação nuclear. O medidor que apresentou maior valor de resíduo foi o N1, com valores máximos de resíduo de 3,7% para a base de dados e 5,6 % para a semana 2 (Figura 46).

Na Figura 47 estão agrupadas as variáveis de posição de barras, vazões e condutividade da água. Os resíduos máximos da variáveis de vazão foram próximos porém menores do que os resíduos obtidos no modelo 1. Os resíduos das variáveis de posição de barras foram próximos aos valores obtidos pelo modelo2, sendo significativamente menor para a variável Z1 (posição de barra de controle). Para as medidas de condutividade da água, o valor máximo de resíduo foi de 7,7%.

No gráfico da Figura 48 tem-se os valores de resíduos para as variáveis de medidas de radiação nuclear. Essas variáveis apresentam a maior variação nos valores de resíduos, apresentando resíduo de 5% para a variável R7, a resíduo de 86% para a variável R14. As medidas de parâmetros de radiação nuclear apresentam flutuações estatísticas inerentes ao processo de medida. O que se observa nos dados de medidas de radiação nuclear é que os valores de ruídos também apresentam uma variação, observando-se valores de ruído de 30 a 40% nas variáveis R13 e R14. Possivelmente essa seja a causa dos altos valores de resíduos encontrados na monitoração.

Os resíduos das variáveis de temperatura tiveram valores semelhantes aos obtidos nos dois modelos anteriores (Figura 49).

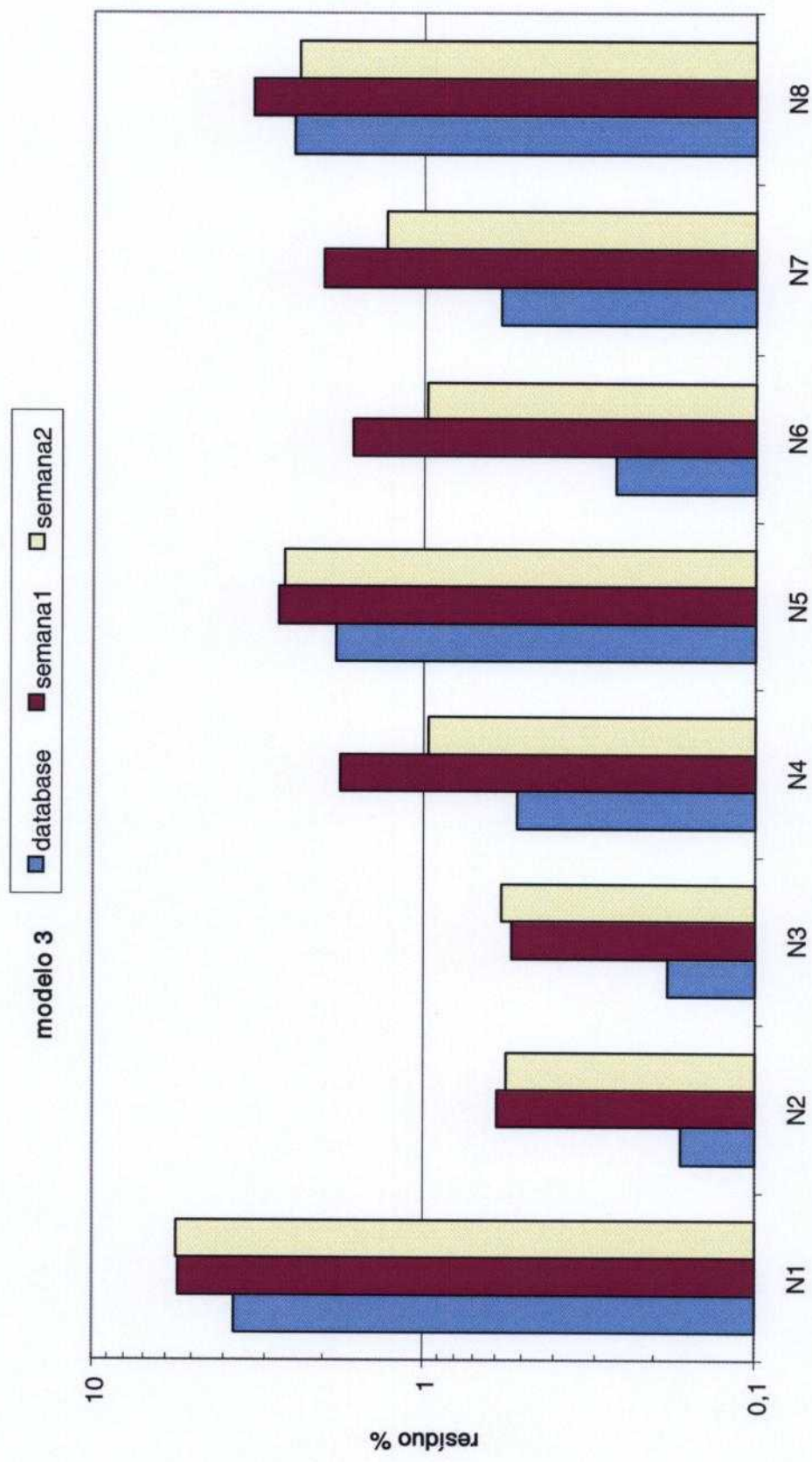


FIGURA 46. Mapa de resíduos para dados de operação do reator IEA-R1. Modelo 3.

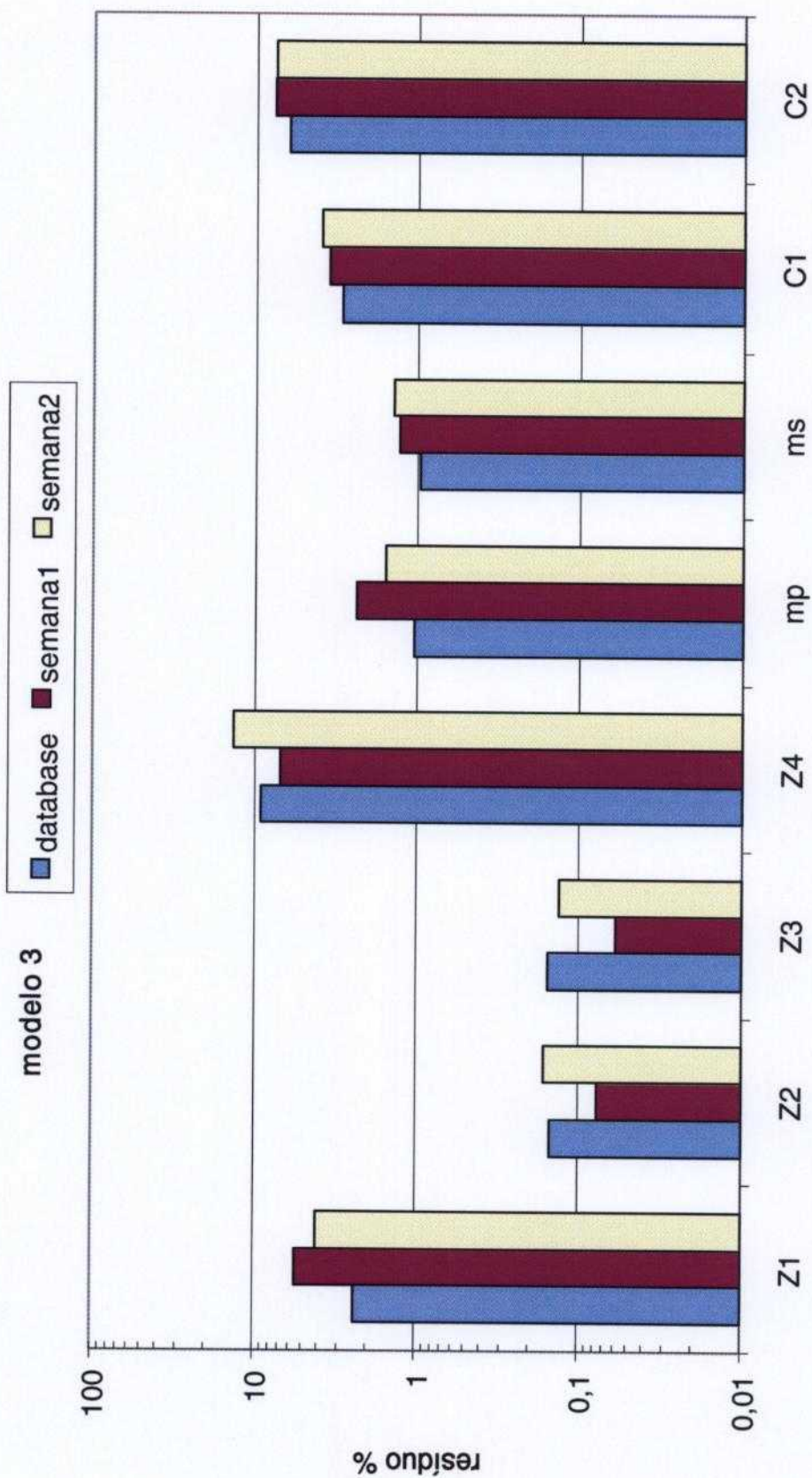


FIGURA 47. Mapa de resíduos para dados de operação do reator IEA-R1, Modelo 3.

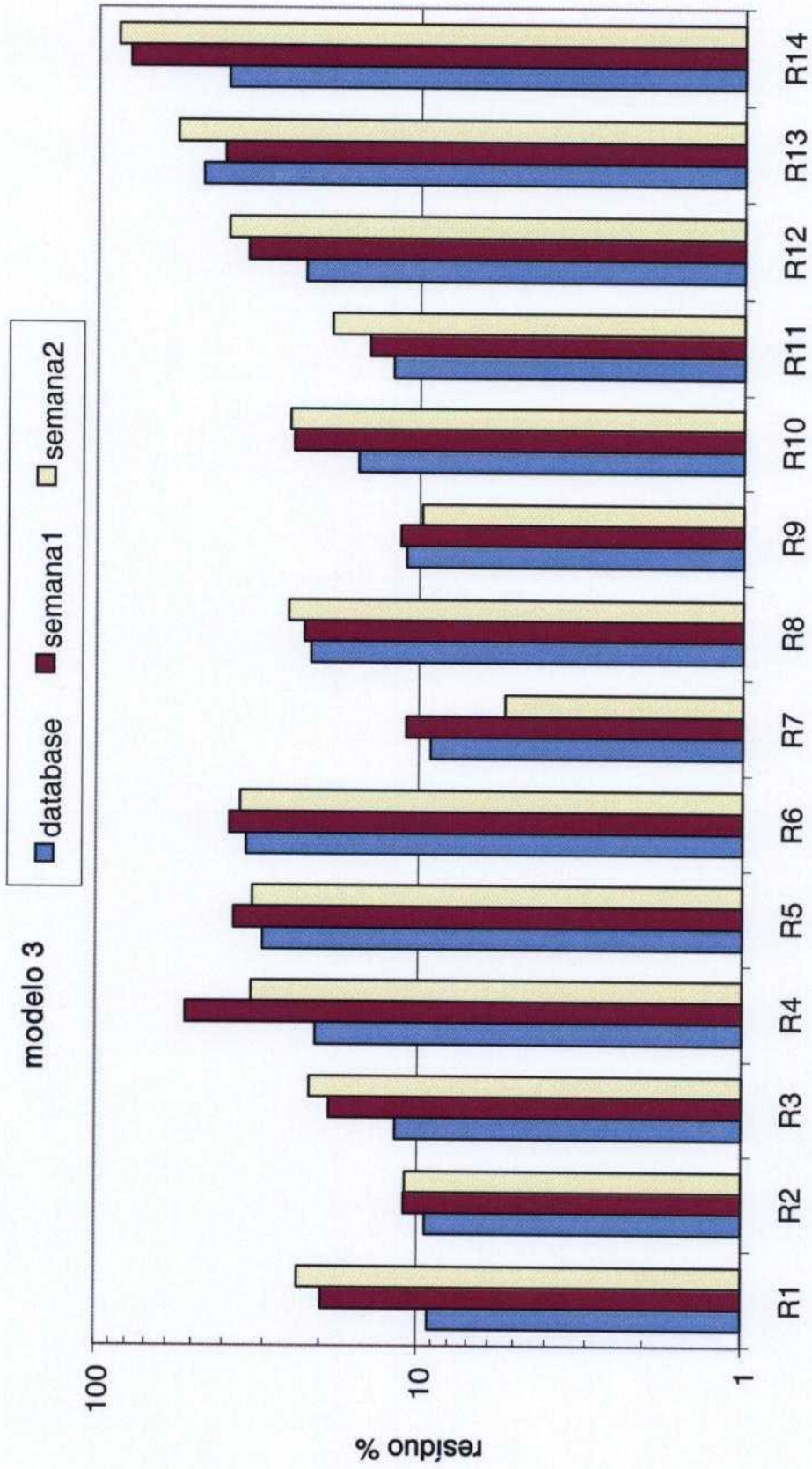


FIGURA 48. Mapa de resíduos para dados de operação do reator IEA-R1. Modelo 3.

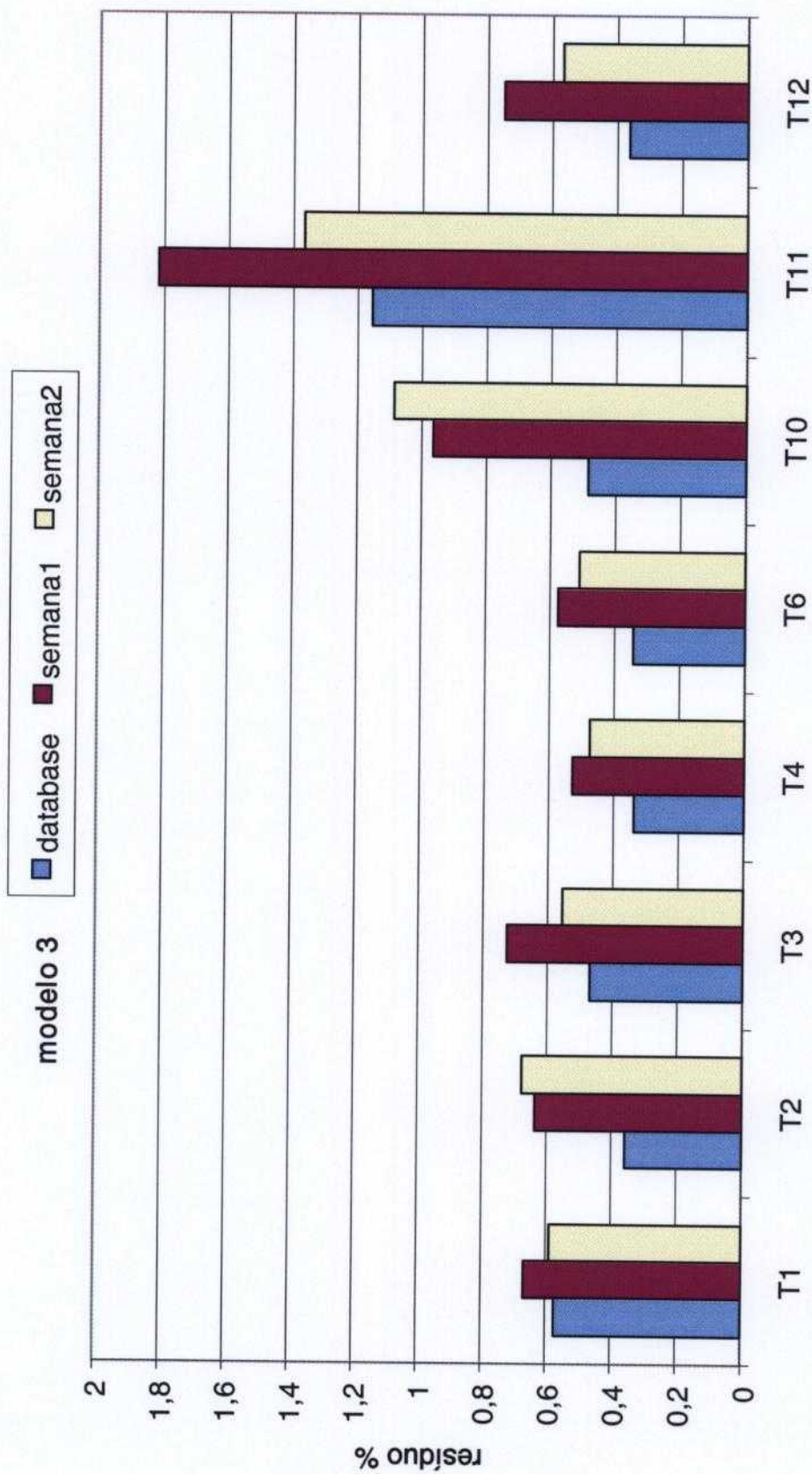


FIGURA 49. Mapa de resíduos para dados de operação do reator IEA-R1. Modelo 3.

7.3.4 Comparação entre os 3 modelos

Tem-se três modelos GMDH todos eles feitos com dados de operação. O primeiro foi feito considerando-se 10 variáveis de processo, temperaturas e vazões. O segundo possui 9 variáveis e incluiu variáveis nucleares, como taxas de dose, potência nuclear e posição de barras. O terceiro foi o modelo mais ousado, pois incluiu todas as variáveis no total de 38 variáveis. De acordo com a teoria GMDH o melhor modelo deveria ser aquele que considera todas as variáveis, pois o próprio modelo se encarregaria de excluir as variáveis que não são significativas para o resultados final na estimativa da variável. Além disso, o algoritmo descarta a utilização de variáveis correlacionadas, que poderiam resultar em uma colinearidade.

Foi feita a comparação entre os resultados para as variáveis comuns aos três modelos, e os valores de resíduos estão no gráfico da Figura 50.

Observando-se o gráfico da Figura 50 nota-se que para as variáveis de temperatura e vazão os três modelos produziram resultados aproximados.

Outra observação é que para as variáveis N2, Z1, R1 e R2 os valores de resíduos foram **menores** para o modelo 3 que utilizou 38 variáveis do que o modelo 2 que utilizou apenas 9 variáveis. Esse resultado comprova o fato de que o algoritmo GMDH possui a propriedade de selecionar as variáveis que resultarão em um modelo melhor, ou seja, que produzam valores menores de resíduos.

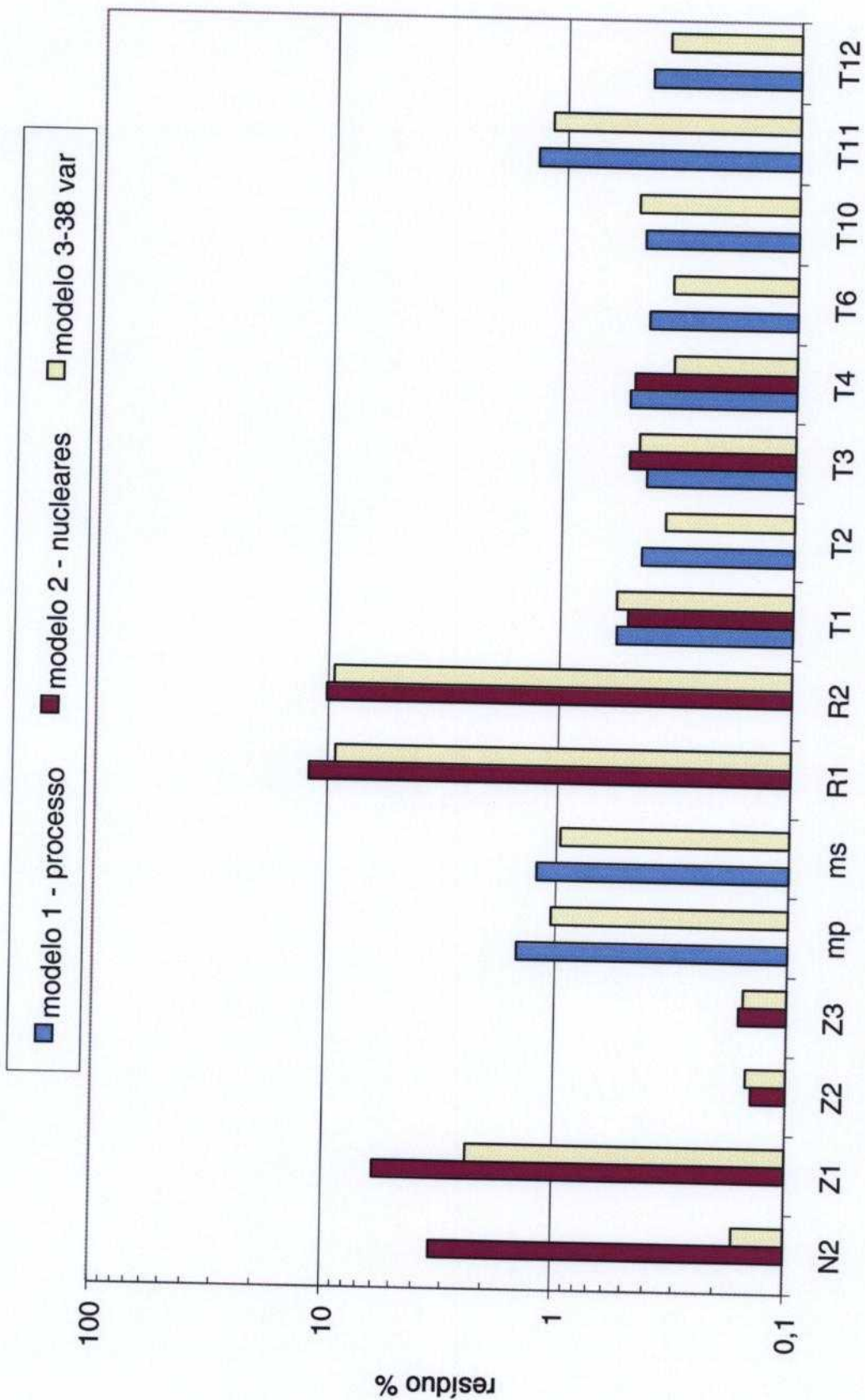


FIGURA 50. Comparação entre os resultados dos modelos 1, 2 e 3.

7.3.5 Dados com falha

Para completar o sistema de monitoração e diagnóstico do reator IEA-R1 é necessário monitorar dados com falhas conhecidas, e a partir dos resultados obtidos estabelecer as regras do sistema de diagnóstico. Porém, não se dispõe de um banco de dados com falhas do reator IEA-R1. Seria o caso então de se inserir a falha de alguma forma artificial, seja através de um experimento, ou uma perturbação na operação normal de forma a refletir em uma mudança nos valores das variáveis.

Os procedimentos que envolvem a operação de um reator nuclear são determinados rigorosamente. Mesmo para um reator de pesquisas, como é o caso do reator do Ipen IEA-R1, existem normas e procedimentos que devem ser obedecidos durante a sua operação. Qualquer ação diferente do estabelecido nas normas de operação deve ser antes investigada detalhadamente e o procedimento deve ser submetido à aprovação de um Comitê de Segurança. Por esse motivo, optou-se por gerar falhas sinteticamente aos dados do reator.

No caso do modelo teórico do reator IEA-R1 as falhas foram definidas como sendo um aumento de 10% no valor médio da variável. Esse valor foi determinado para estabelecimento da metodologia.

Para os dados de operação do reator, o sistema de monitoração e diagnóstico será aplicado ao estudo de falhas nas variáveis de **temperatura**. Serão considerados como sendo falha os valores de resíduos que forem maiores que os limites de valores de **calibração** do instrumento. Portanto, se a diferença entre o valor lido e o valor estimado pelo modelo GMDH for maior do que o limite de calibração do instrumento, o sistema de monitoração e detecção de falhas irá indicar uma falha no instrumento.

O Subsistema de Medição de Temperatura do reator de pesquisas do Ipen é formado por um conjunto de 24 termopares distribuídos em vários pontos, dentro e fora do prédio do reator [24]. Os termopares cujos sinais vão para o Sistema de Aquisição de Dados SAD são do tipo T (cobre-constantan).

O valor limite de resíduo para os termopares foi estabelecido de acordo com os valores de limites de erro sugeridos pelo fabricante dos termopares (ECIL) [13]. Esses valores são confirmados por outros fabricantes (OMEGA) [41] e pela referência [37]. De acordo com essas referências, são fornecidos valores limites de erro para termopares tipo padrão e para termopares especiais. No caso do reator IEA-R1 todos os termopares são calibrados anualmente e portanto foram considerados os valores limites de erro para

termopares especiais. O valor limite para termopares do tipo T é $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ para termopares especiais.

Conforme descrito nos capítulos anteriores, foram desenvolvidos três modelos GMDH para o reator de pesquisas do Ipen. Cada modelo utilizou um número diferente de variáveis. Como os resultados do modelo GMDH para as temperaturas foram semelhantes para os três modelos desenvolvidos, optou-se por utilizar o modelo 1 para desenvolvimento do sistema de diagnóstico de falhas.

O próximo passo consiste em gerar dados com falhas. O resultado da monitoração de dados com falha fornecerá o mapa de resíduos a partir do qual são estabelecidas as regras do sistema de diagnóstico.

Como o valor de limite de erro de calibração é $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$, a **falha** foi definida como uma diferença de $\pm 1^{\circ}\text{C}$ entre a valor lido e o valor estimado pelo modelo GMDH. Foram gerados dados com falha, acrescentando-se $\pm 1^{\circ}\text{C}$ às variáveis de temperatura, como ilustrado na Figura 51.

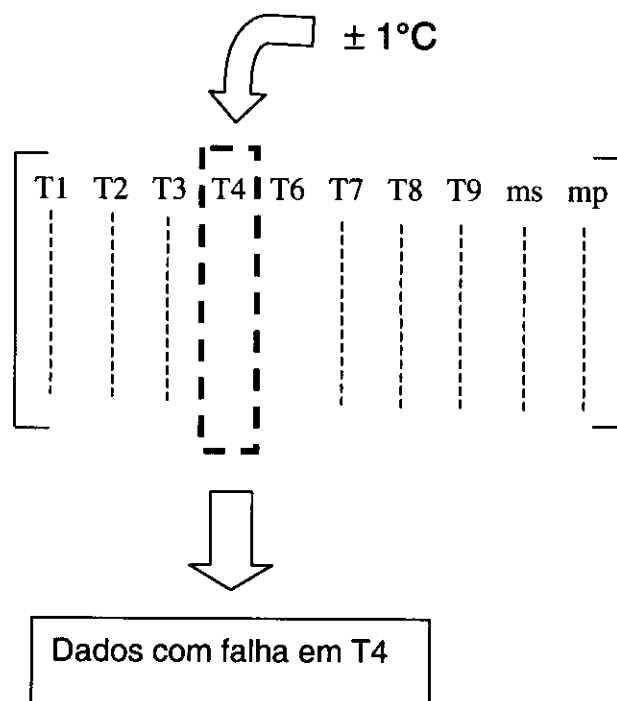


FIGURA 51. Dados com falha.

Os resíduos obtidos na monitoração dos dados com falha foram utilizados para gerar o mapa de resíduos. Nas Figuras a seguir tem-se o mapa de resíduos para os dados de operação, onde foram incluídas falhas sinteticamente em cada uma das variáveis de temperatura.

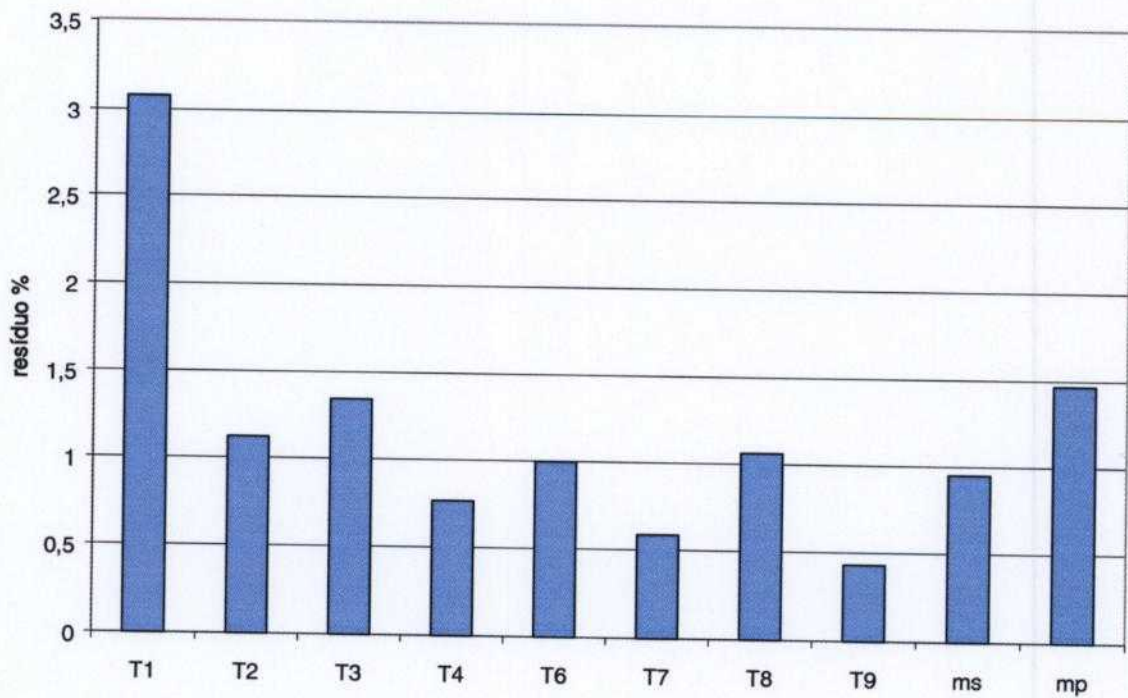


FIGURA 52. Mapa de resíduos para falha em T1.

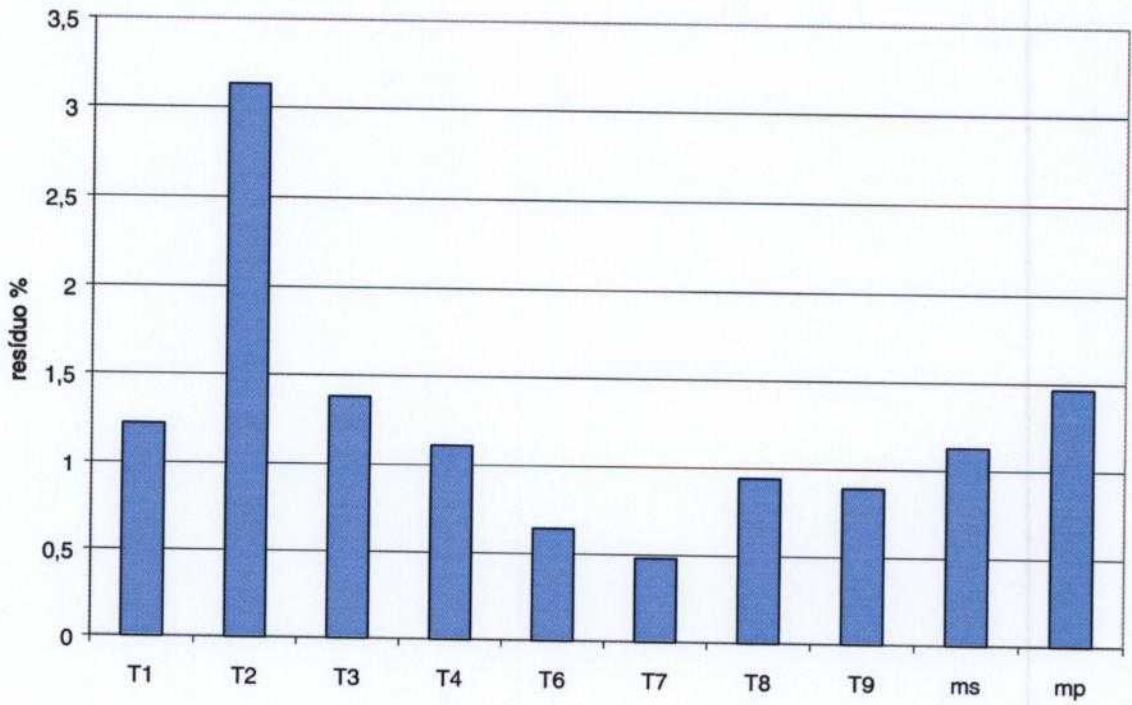


FIGURA 53. Mapa de resíduos para falha em T2.

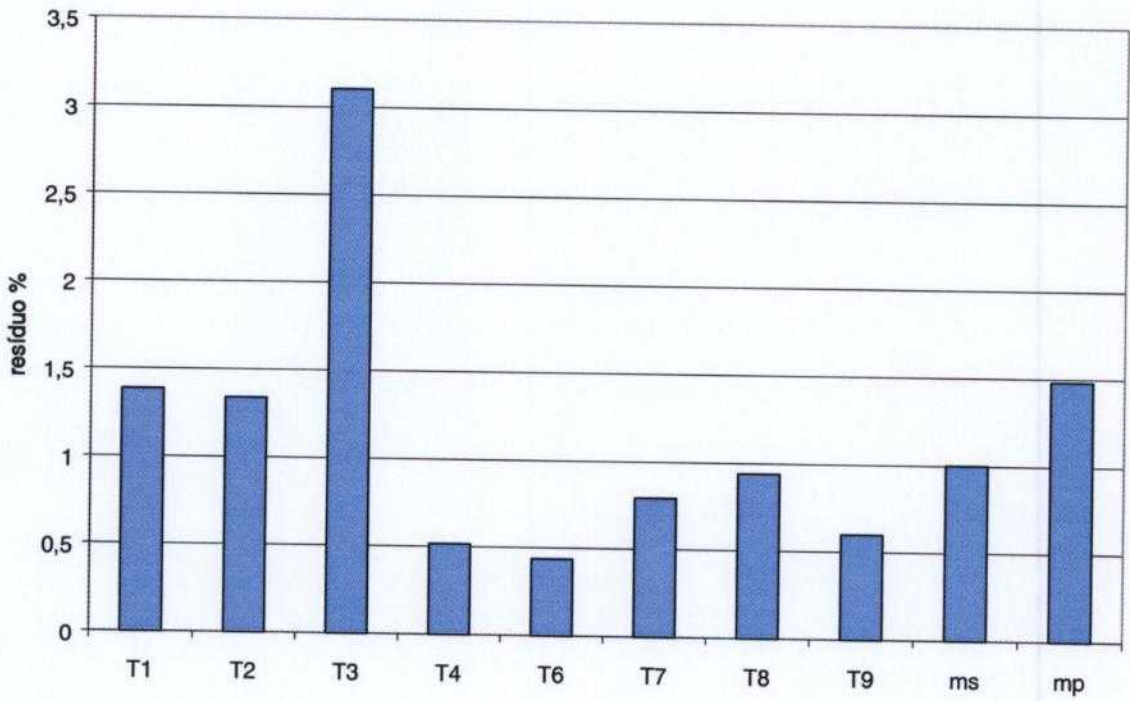


FIGURA 54. Mapa de resíduos para falha em T3.

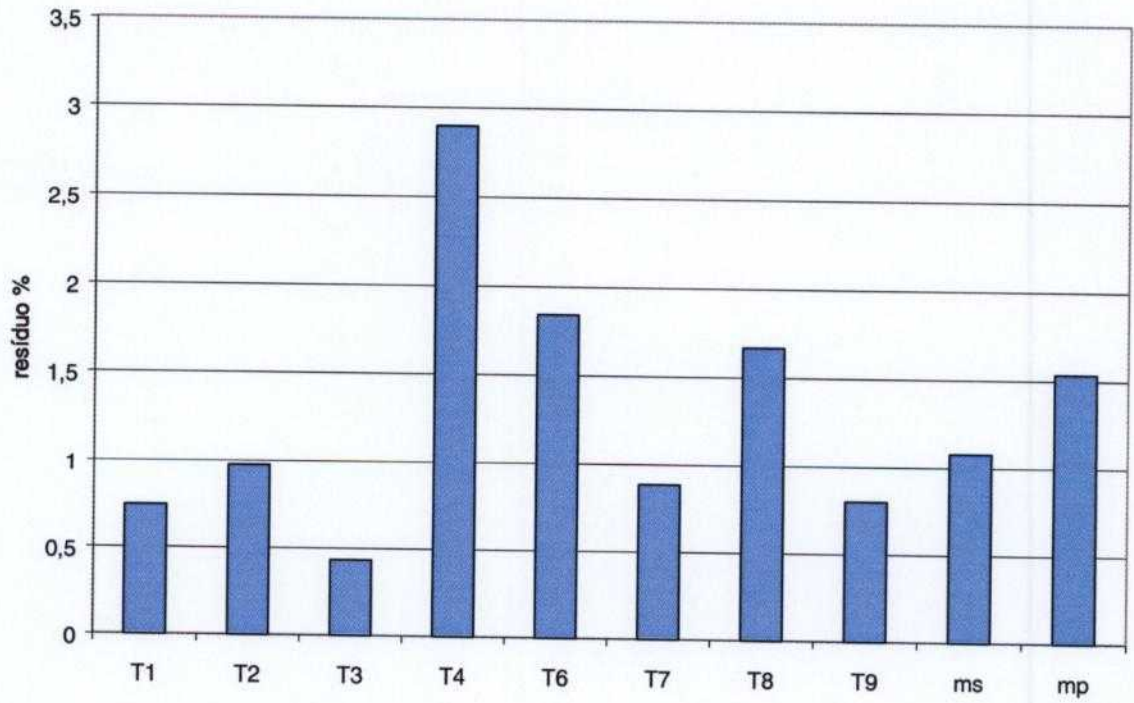


FIGURA 55. Mapa de resíduos para falha em T4.

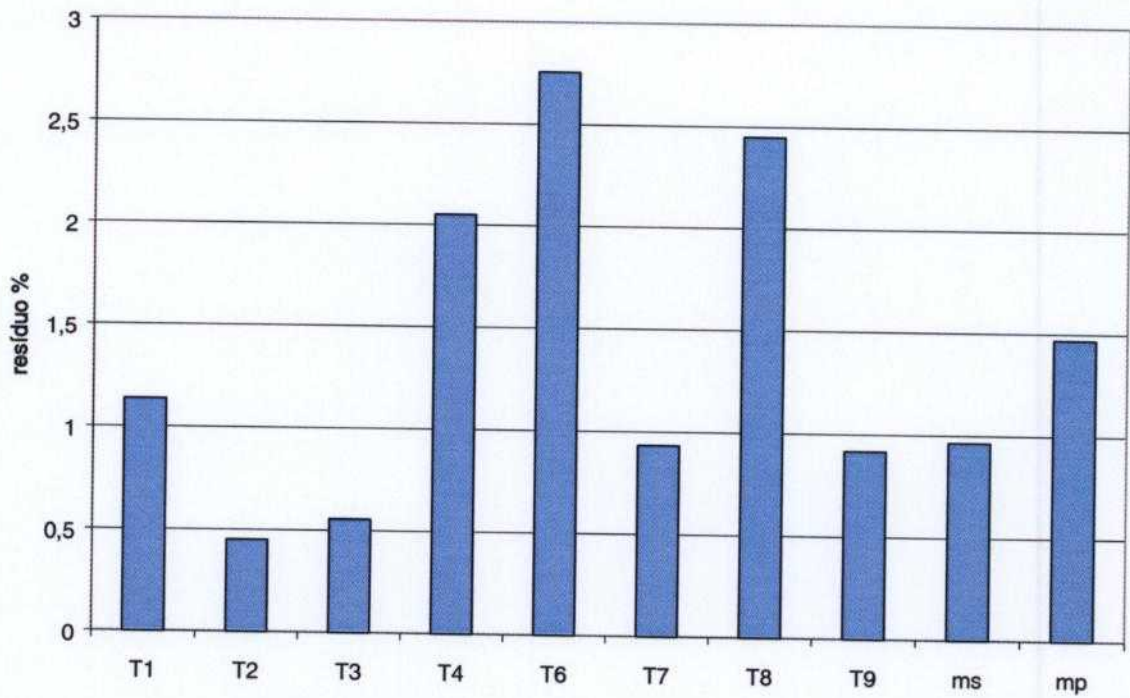


FIGURA 56. Mapa de resíduos para falha em T6.

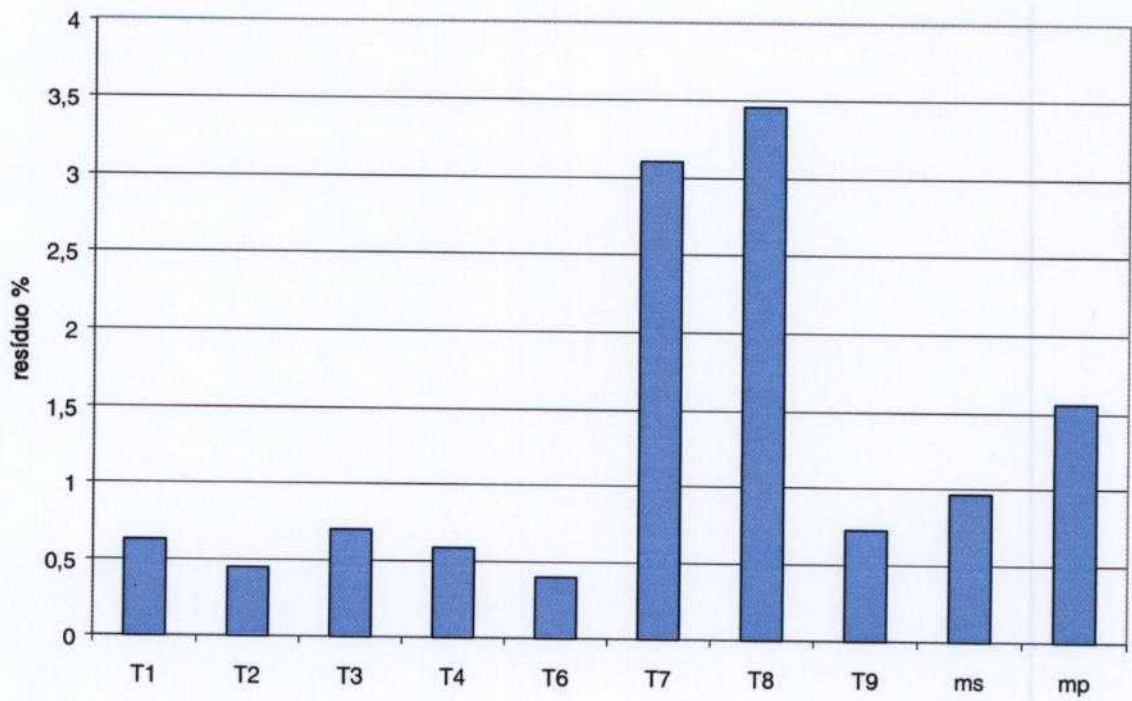


FIGURA 57. Mapa de resíduos para falha em T7.

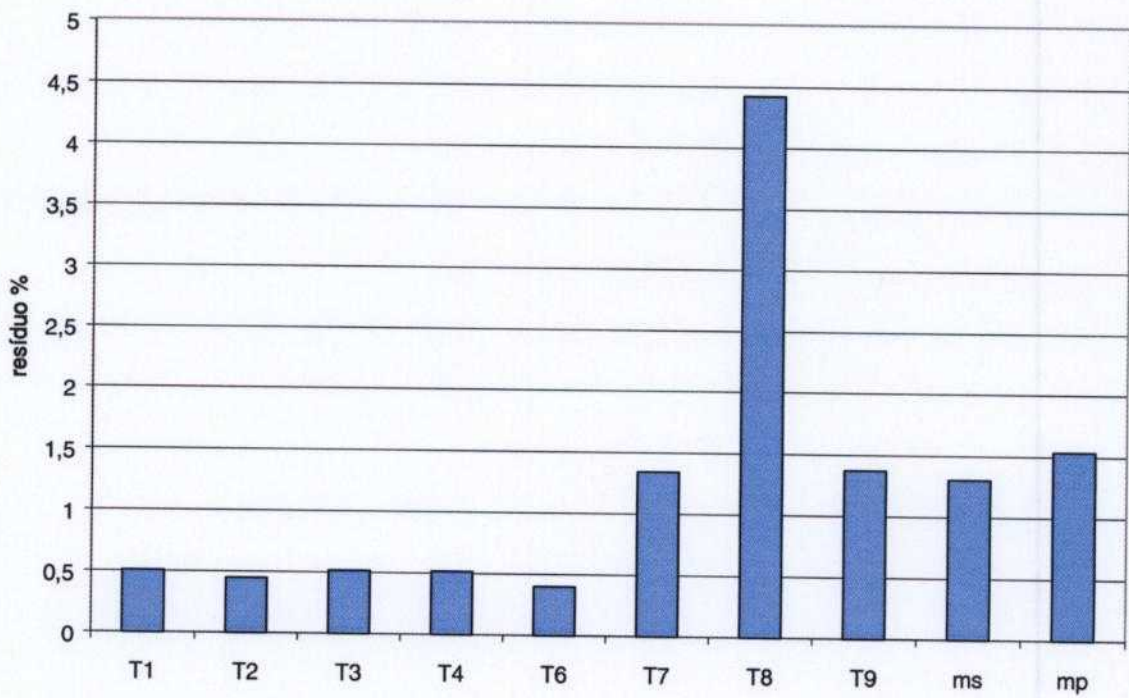


FIGURA 58. Mapa de resíduos para falha em T8.

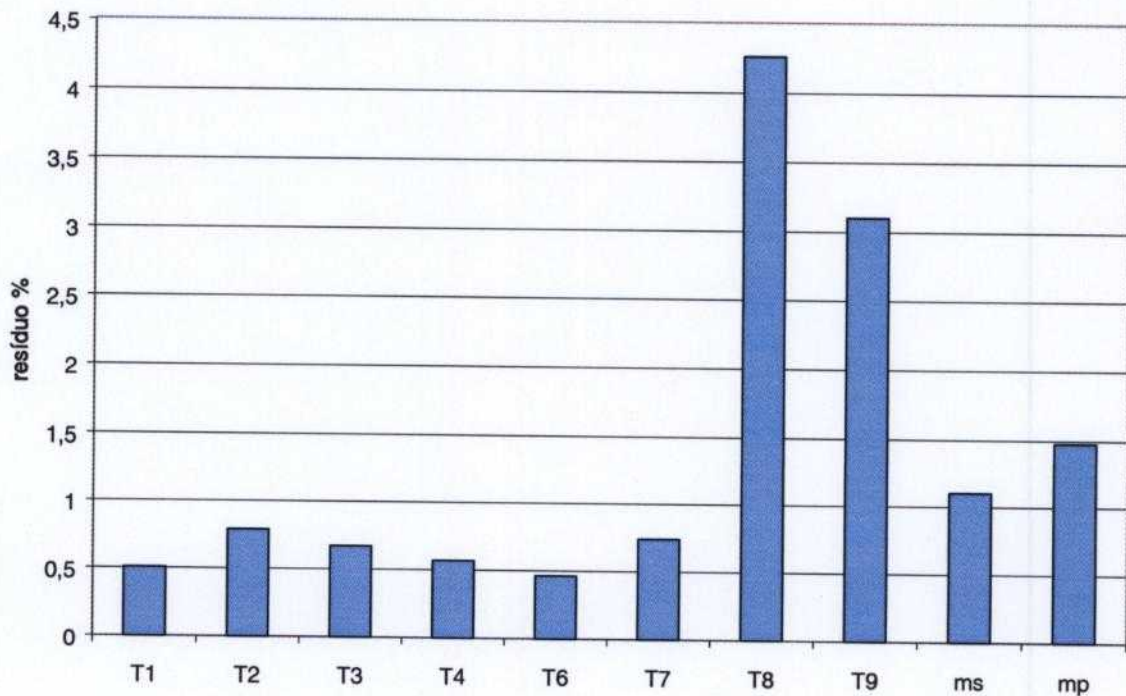


FIGURA 59. Mapa de resíduos para falha em T9.

O conjunto de mapas de resíduos apresentado é válido para os resultados obtidos na monitoração de dados com falhas conhecidas de $\pm 1^\circ\text{C}$ nas variáveis de temperatura. Porém, um sistema de diagnóstico deve ser robusto, e o diagnóstico resultante deve ser válido para outras semanas de operação. Uma forma de tornar os resultados do sistema de diagnóstico mais abrangentes é a utilização da Lógica Nebulosa (Lógica Fuzzy) [61]. Em contraste aos sistemas lógicos clássicos, a lógica fuzzy formaliza modos de raciocínio que são aproximados em vez de exatos. O especialista do domínio usa expressões lingüísticas para exprimir seu conhecimento. Desta forma, a lógica nebulosa proporciona uma ferramenta sistemática para tomada de decisão do diagnóstico.

7.3.6 Sistema Fuzzy

Com o objetivo de mostrar a potencialidade de utilização da lógica nebulosa no diagnóstico de falhas de sensores de temperatura do reator IEA-R1, foi desenvolvido um sistema de inferência fuzzy simples e objetivo. As regras do sistema fuzzy são baseadas nos mapas de resíduos obtidos da monitoração de dados com falha. A lógica nebulosa foi introduzida em 1965 por Zadeh [61], e a idéia básica consiste em ampliar os conceitos da lógica clássica, onde uma proposição pode ter apenas dois valores: verdadeira ou falsa. Na lógica nebulosa, os conceitos se aproximam mais das variáveis lingüísticas, sendo que o valor de uma proposição pode variar entre os valores verdadeiro e falso com determinado peso. Entre outras, a diferença entre a lógica clássica e a lógica nebulosa, é que a lógica clássica trata conceitos como categorias discretas, enquanto que na lógica nebulosa pode-se atribuir a um mesmo conceito diversos valores lingüísticos com graus de certeza associados. O conceito principal da teoria da lógica nebulosa é o da função de pertinência, que numericamente representa o grau no qual um elemento pertence a um determinado conjunto.

São cinco os passos para aplicação de Lógica Nebulosa:

1. Modelagem das variáveis de entrada. Transformação de valores numéricos em valores nebulosos;
2. Modelagem das variáveis de saída. Transformação de valores numéricos em valores nebulosos;
3. Determinação das regras do sistema especialista. Aplicação de métodos de inferência;
4. Aplicação de operadores da lógica nebulosa e agregação das variáveis de saída (combina as saídas de cada regra em um conjunto nebuloso);
5. Transformação de valores nebulosos em valores numéricos (defuzzificação).

O sistema fuzzy foi implementado utilizando a toolbox do Matlab [17]. Para as regras com dois antecedentes relacionados com o conectivo *e*, o operador de *interseção* é aplicado, tomando o valor mínimo entre os dois antecedentes. Para cada regra, o grau de ativação da ação de controle é calculada de acordo com o resultado da combinação de antecedentes. Terminada a inferência, a ação final de controle é calculada a partir da união (operador *máximo*) das contribuições de cada regra ativada gerando uma única e nova função. Finalmente, no processo de defuzzificação, utilizou-se o *método do centro de área* (CDA) que calcula o centro da área da função inferida.

As variáveis de entrada são os desvios das variáveis monitoradas, ou seja a diferença entre o valor lido e o valor estimado pelo modelo GMDH, das variáveis: T1, T2, T3, T4, T6, T7, T8 e T9, vazão do circuito primário (mp) e vazão do circuito secundário (ms). As variáveis de saída são as possibilidades de falha em cada uma das variáveis de temperatura.

Modelagem das Variáveis de Entrada

As funções de pertinência da variável T1 são mostradas na Figura 60. Para as demais variáveis de temperatura as funções de pertinência são iguais. Para as variáveis de temperatura foi considerado o intervalo de ± 1 °C como o intervalo para o qual o sensor de temperatura está funcionando sem falha. Para valores de desvios maiores, existe a possibilidade de falha. Para as vazões do circuito primário e secundário foi considerado um intervalo de 5% do valor nominal das vazões.

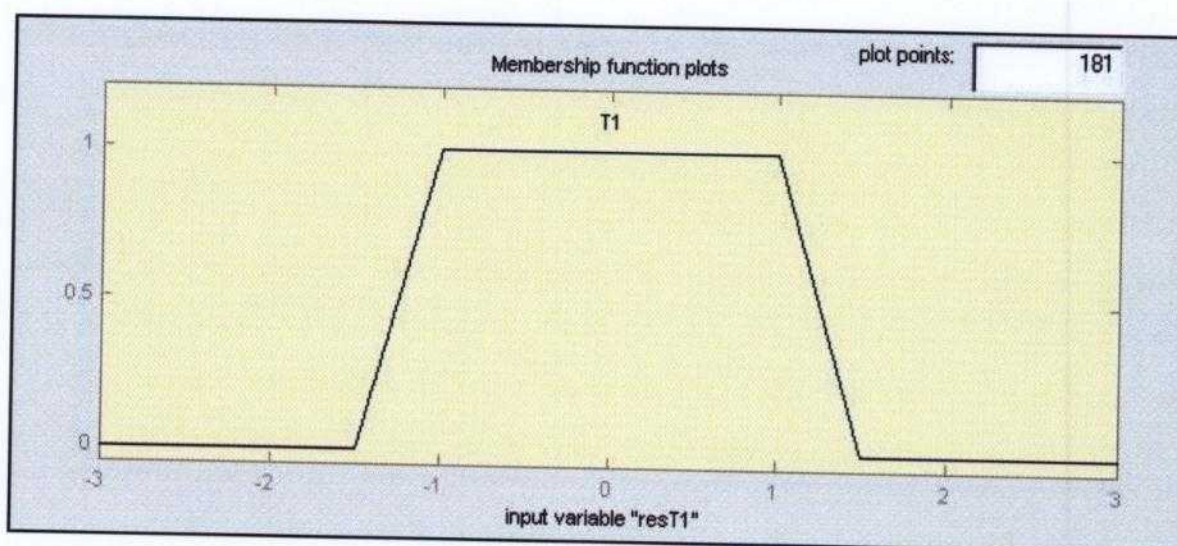


FIGURA 60. Função de pertinência das variáveis de entrada.

Modelagem das Variáveis de Saída

As variáveis de saída são as possibilidades de falha de cada variável. Na Figura 61 tem-se a função de pertinência da primeira variável de saída (falha T1). As funções de pertinência das demais variáveis de saída são iguais.

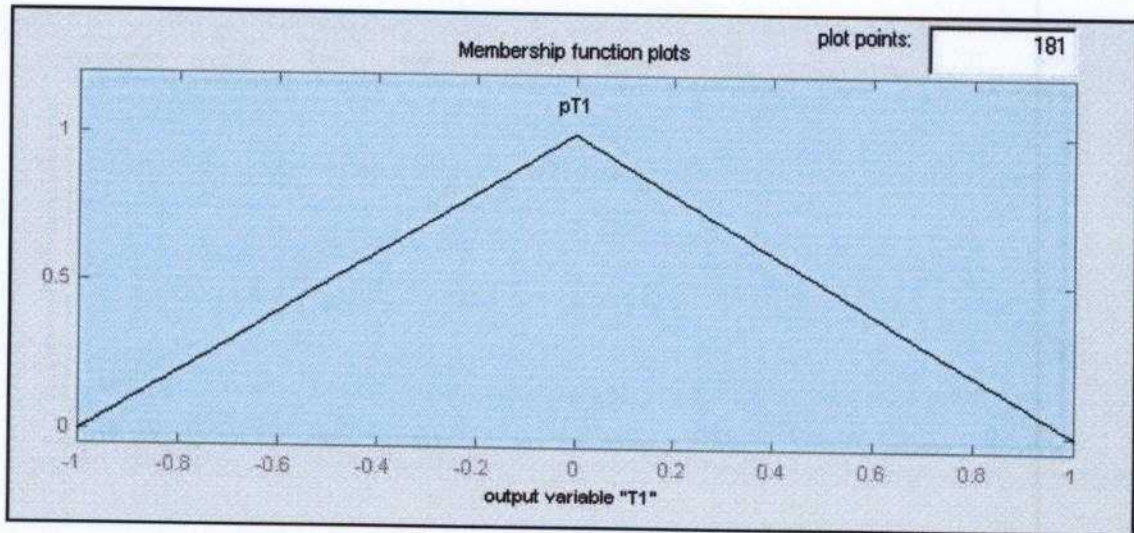


FIGURA 61. Função de pertinência das variáveis de saída.

Determinação das regras do sistema especialista

Para implementação do sistema fuzzy, utilizou-se como base de conhecimento os resultados da monitoração de dados com falha e portanto as regras do sistema fuzzy são baseadas nos mapas de resíduos.

A toolbox Fuzzy do Matlab possui uma janela de visualização das regras. Nesta janela pode-se verificar o resultado do sistema fuzzy determinando-se valores para as variáveis de entrada e verificando-se na própria janela o resultado da inferência. Os valores das variáveis de entrada podem ser digitados numa caixa de edição de texto ou podem simplesmente ser atribuídos ao arrastar o cursor vermelho em cada variável de entrada. Na Figura 62 tem-se a janela de visualização dos resultados, onde está assinalado um valor de desvio para a variável T1 maior do que os limites de erro de calibração. Neste caso, o resultado do sistema de inferência fuzzy mostra uma falha na variável T1. As demais variáveis não apresentam falha. As regras do sistema de diagnóstico foram testadas para falhas nas demais variáveis, e o sistema apontou as falhas de forma adequada, demonstrando assim a potencialidade de utilização da lógica nebulosa no diagnóstico.

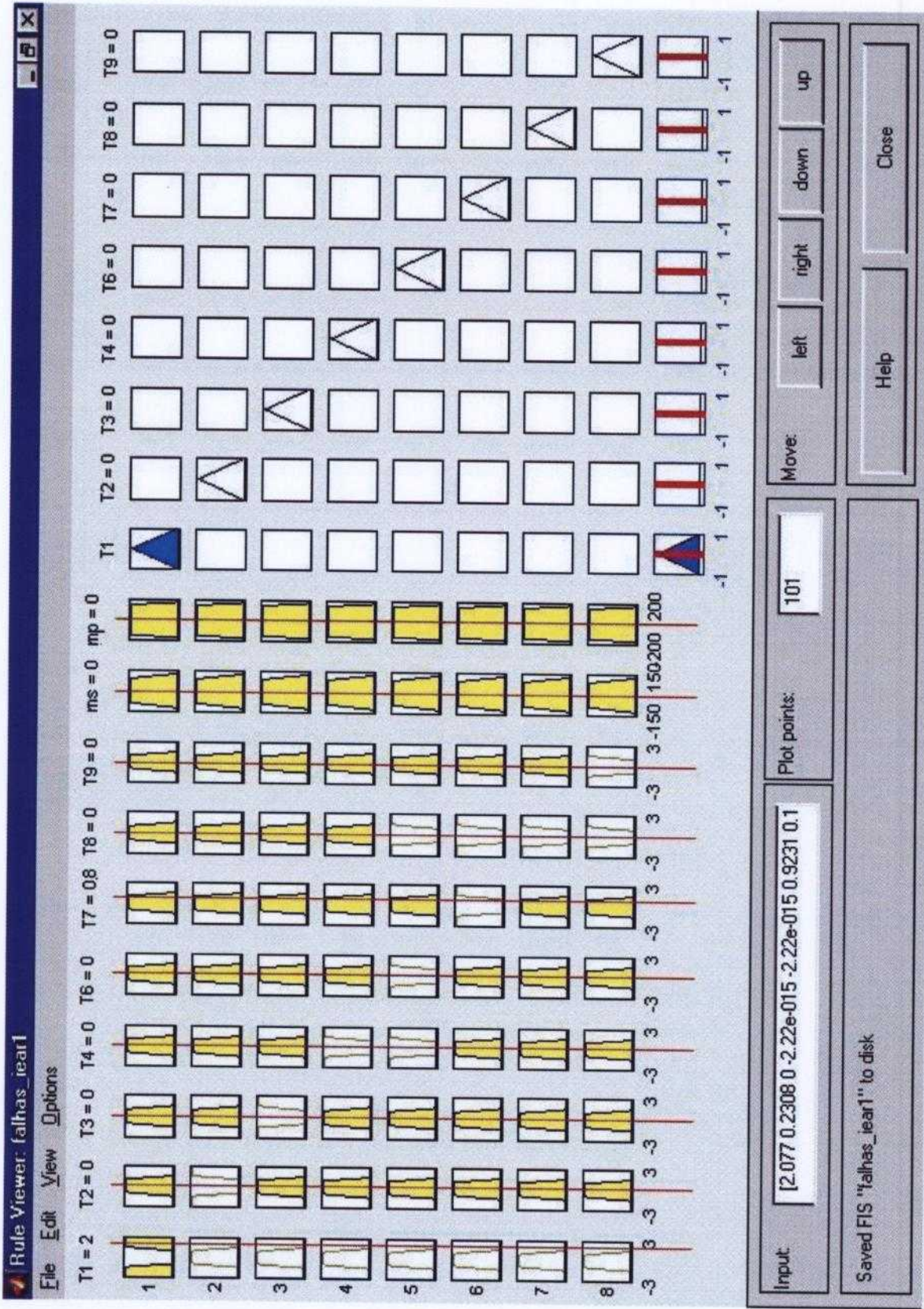


FIGURA 62. Visualização das regras do sistema fuzzy.

8 ANÁLISE DOS RESULTADOS

8.1 Modelo teórico de trocador de calor

O primeiro modelo teórico desenvolvido foi um modelo teórico de trocador de calor, e a metodologia GMDH foi aplicada para estimativa do valor da potência térmica do trocador de calor. Os aspectos estudados com esse modelo foram: precisão do método, normalização, influência do número de observações e nível de ruído. A precisão do método depende de um compromisso entre o número de pontos dos dados de entrada para a determinação dos coeficientes das equações do modelo GMDH, e o valor de alfa, sendo alfa um parâmetro adimensional utilizado nos cálculos de inversão das matrizes. A normalização dos dados é fundamental para obtenção de resultados mais precisos, pois os resultados obtidos sem normalização apresentaram um valor de resíduo maior do que os resultados dos mesmos dados normalizados. Quanto maior o número de observações dos dados de entrada, mais preciso é o resultado do modelo GMDH, sendo que o valor do resíduo mínimo tende para o valor de erro devido ao arredondamento para dupla precisão. Com o aumento do nível de ruído nos dados de entrada, aumenta o valor do resíduo mínimo do modelo GMDH, observando-se porém um ponto de inflexão a partir do qual o valor do resíduo se aproxima do valor obtido para o caso de dados constantes, ou seja, ruído igual a zero.

8.2 Modelo teórico do reator IEA-R1

O modelo teórico do reator de pesquisas IEA-R1 foi desenvolvido baseado em parâmetros físicos e operacionais do reator IEA-R1. O modelo foi desenvolvido utilizando a ferramenta GUIDE do Matlab, e possui uma interface através da qual é possível gerar dados de operação normal, dados com diferentes níveis de ruído nas variáveis de entrada e dados com falhas. O modelo teórico do reator possui 10 variáveis, e a metodologia GMDH foi desenvolvida para o cálculo da estimativa das dez variáveis. A base de dados foi composta para 10 condições de operação, com potência variando de 10 a 100%. Apenas as variáveis de vazão no primário e secundário, e a temperatura de entrada do trocador de calor T8 permaneceram constantes. Foram considerados dois conjuntos de base de dados: o primeiro contém variáveis sem ruído e o segundo contém variáveis com ruído. Os valores

de ruído foram baseados nos valores de ruído dos dados típicos de operação, e os resultados dos dois modelos GMDH desenvolvidos para o modelo teórico do reator IEA-R1 foram coerentes com as conclusões do modelo teórico do trocador de calor, ou seja, dados sem ruído apresentaram valores de RMIN menores do que dados com ruído. Por se tratar de um modelo teórico, o valor de RMIN foi atingido já na primeira geração do algoritmo para a maioria das variáveis, sendo que no caso dos dados com ruído, para as variáveis T8, ms e mp foram necessárias maior número de gerações para atingir os valores de RMIN.

Na monitoração de dados sem ruído, o valor máximo de resíduo encontrado foi de 0,016%, e na monitoração de dados com ruído, os valores máximos de resíduos foram 0,38% para as variáveis de temperatura, 1,2% para a vazão no circuito secundário e 0,54% para a vazão do circuito primário. Esses valores são proporcionais aos valores de ruído das variáveis, que são: temperaturas 0,4%, vazão no secundário (ms) 2% e vazão no primário (mp) 1%.

Com o modelo teórico do reator IEA-R1 foi desenvolvido um sistema de monitoração e diagnóstico completo, compreendendo as etapas de desenvolvimento da estrutura do modelo GMDH, monitoração de dados sem falha e dados com falha. Nesse estudo a falha foi considerada como sendo um aumento de 10% no valor da variável.

Foram monitorados dados que contêm valores conhecidos de falhas, e o resultado da monitoração destes dados gerou um conjunto de mapas de resíduos para cada condição de falha estabelecida.

8.3 Dados de operação

Para o desenvolvimento do Sistema de Monitoração e Diagnóstico foram utilizados os dados do Sistema de Aquisição de Dados (SAD) do reator de pesquisas do Ipen que coleta dados de 24 sensores de temperatura, vazão do circuito de refrigeração primário e secundário, variação de pressão no núcleo do reator, medida de nível de água da piscina, 2 medidas de condutividade da água da piscina, 7 medidas de potência nuclear e uma medida de período, 14 medidas de radiação nuclear, e medidas de posição de 4 barras (1 de controle e 3 de segurança). Para formar a base de dados na elaboração do modelo GMDH foram escolhidos os dados de operação de Abril de 2004. Durante esse período a potência de operação permaneceu constante no valor de 4,2 MW. Foram desenvolvidos três modelos GMDH. O primeiro possui as mesmas variáveis do modelo teórico do reator,

chamado modelo 1; o segundo possui variáveis nucleares, chamado modelo 2, e o terceiro possui todas as variáveis, chamado modelo3.

Resultados do modelo 1

Embora as variáveis do modelo 1 sejam as mesmas variáveis do modelo teórico do reator IEA-R1, as condições de operação escolhidas para compor a base de dados foram diferentes. Para o modelo teórico foram consideradas 10 potências de operação, enquanto que para os dados de operação foi considerado apenas um valor de potência. Porém, a grande diferença entre os dados do modelo teórico do reator e os dados de operação é que nos dados de operação as variáveis de temperatura apresentam uma flutuação ao longo do período de operação do reator. Essa flutuação existe porque o sistema de refrigeração do secundário do trocador de calor é feito através de torres de refrigeração situadas na parte externa ao prédio do reator e a temperatura ambiente sofre variações ao longo do período de operação do reator. Essa flutuação é propagada para as demais variáveis de temperatura.

Os valores das variáveis estimadas pelo modelo GMDH são próximos dos valores reais e acompanham as flutuações observadas ao longo do período de operação (Figura 37). Essa é uma observação muito importante, visto que na determinação do modelo não foi levada em consideração nenhuma variação no tempo, ou seja, não foi acrescentado nenhum tipo de cálculo adicional ao convencional, que está estabelecido na literatura como sendo aplicável somente para dados constantes.

Pode-se observar que a estrutura do modelo GMDH determinada para a base de dados ao ser aplicada a dados de outras semanas de operação mostrou bons resultados (Figura 40). Embora as condições de potência de operação tenham sido as mesmas da base de dados, ou seja, potência de operação de 4,2 MW, as flutuações ao longo do período de operação são diferentes. Como o modelo GMDH é formado pela relação entre as variáveis, estas relações se mantiveram, e o valor das variáveis estimadas pelo modelo GMDH foi próximo do valor lido.

Para as temperaturas, o valor máximo de resíduo foi de 0,57%, a menos da variável T11 (temperatura de entrada do circuito secundário do trocador de calor), que apresentou um valor máximo de resíduo de 1,33%. Os valores de resíduos máximos das vazões foram, 1,2% para a vazão do secundário e 1,5% para a vazão do primário.

Resultados do modelo 2

O modelo 2 foi feito para um novo conjunto de variáveis do SAD incluindo as seguintes variáveis nucleares: potência nuclear N2, posição de barra de controle Z1, posição de barra de segurança Z2 e Z3, taxa de dose sobre a ponte de sustentação do núcleo do reator R1 e R2. As variáveis de temperatura do modelo 2 são: T1, T3 e T4.

Para as variáveis temperaturas, os valores de resíduos foram próximos aos valores obtidos pelo modelo anterior, obtendo-se um valor máximo de resíduo de temperatura de 0,51% para a base de dados e 1,16% considerando as três semanas de operação. Para Z2 e Z3, os valores máximos de resíduo foram menores do que 0,18%. Os valores de resíduos das demais variáveis nucleares são maiores, sendo que para a variável R1 o valor máximo foi de 12% para a base de dados e 19% para a monitoração de dados da semana 2.

Resultados do modelo 3

O modelo 3 foi feito para um novo conjunto de variáveis incluindo o maior número possível das variáveis do SAD. Foram consideradas apenas as variáveis de temperaturas e vazão relacionadas ao circuito de refrigeração que estava sendo utilizado. As variáveis de temperatura de carcaça de motores e "no-breaks" também não foram incluídas nesse novo modelo, assim como as temperaturas da torre de refrigeração e as medidas de temperatura ambiente. O modelo 3 possui 38 variáveis (Tabela 11).

Apesar do aumento do número e da complexidade dos dados, o modelo GMDH apresentou resultados comparáveis aos resultados obtidos nos modelos anteriores.

Da mesma forma que foi feito para os dois modelos anteriores, foi feita a monitoração para a base de dados e para as duas outras semanas de operação.

As medidas de potência nuclear são feitas por diferentes tipos de sensores de radiação nuclear. O medidor que apresentou maior valor de resíduo foi o N1, com valores máximos de resíduo de 3,7% para a base de dados e 5,6 % para a semana 2 (Figura 46).

Na Figura 47 estão agrupadas as variáveis de posição de barras, vazões e condutividade da água. Os resíduos máximos das variáveis de vazão foram próximos porém menores do que os resíduos obtidos no modelo 1. Os resíduos das variáveis de posição de barras foram próximos aos valores obtidos pelo modelo 2, sendo significativamente menor para a variável Z1 (posição de barra de controle). Para as medidas de condutividade da água, o valor máximo de resíduo foi de 7,7%.

No gráfico da Figura 48 tem-se os valores de resíduos para as variáveis de medidas de radiação nuclear. Essas variáveis apresentam a maior variação nos valores de resíduos, apresentando resíduo de 5% para a variável R7, a resíduo de 86% para a variável R14. As medidas de parâmetros de radiação nuclear apresentam flutuações estatísticas inerentes ao processo de medida. O que se observa nos dados de medidas de radiação nuclear é que os valores de ruídos também apresentam uma variação, observando-se valores de ruído de 30 a 40% nas variáveis R13 e R14. Possivelmente essa é a maior causa dos altos valores de resíduos encontrados na monitoração.

Os resíduos das variáveis de temperatura tiveram valores semelhantes aos obtidos nos dois modelos anteriores (Figura 49).

Para as variáveis de temperatura e vazão os três modelos produziram resultados aproximados, enquanto que para as variáveis N2, Z1, R1 e R2 os valores de resíduos foram **menores** para o modelo 3 (que utilizou 38 variáveis) do que o modelo 2 (que utilizou apenas 9 variáveis). Esse resultado comprova o fato de que o algoritmo GMDH possui a propriedade de selecionar as variáveis que resultarão em um modelo melhor, ou seja, que produzam valores menores de resíduos.

8.4 Dados com falha

Para o estabelecimento das falhas, foram escolhidas as variáveis de temperatura, e foi determinado um valor de resíduo acima do qual é considerado falha. O valor escolhido foi o valor de limite de erro de calibração do medidor de temperatura.

Como os resultados do modelo GMDH para as temperaturas foram semelhantes para os três modelos desenvolvidos, optou-se por utilizar o modelo 1 para desenvolvimento do sistema de diagnóstico de falhas.

O resultado da monitoração de dados com falha conhecida foi utilizado para determinar as regras do sistema de diagnóstico. Para que o sistema de diagnóstico ficasse mais robusto e abrangente, foi desenvolvido um sistema utilizando a lógica nebulosa. Esse sistema foi implementado utilizando a toolbox Fuzzy do Matlab.

As variáveis de entrada são os desvios das variáveis monitoradas, ou seja a diferença entre o valor lido e o valor estimado pelo modelo GMDH, das variáveis: T1, T2, T3, T4, T6, T7, T8 e T9, vazão do circuito primário (mp) e vazão do circuito secundário (ms). As variáveis de saída são as possibilidades de falha em cada uma das variáveis de temperatura.

Para as variáveis de temperatura foi considerado o intervalo de ± 1 °C como o intervalo para o qual o sensor de temperatura está funcionando sem falha. Para valores de desvios maiores, existe a possibilidade de falha. Para as vazões do circuito primário e secundário foi considerado um intervalo de 5% do valor nominal das vazões.

As regras do sistema fuzzy foram baseadas nos mapas de resíduos. As regras do sistema de diagnóstico foram testadas para falhas nas variáveis de temperatura e o sistema apontou as falhas de forma adequada.

9 CONCLUSÕES

O objetivo desta tese, determinar a viabilidade do emprego da metodologia GMDH na monitoração e detecção de falhas em sensores e atuadores de um processo, foi plenamente atingido. Isto foi demonstrado através do desenvolvimento e aplicação de um sistema de monitoração e diagnóstico utilizando dados de operação do reator de pesquisas do Ipen IEA-R1. A metodologia GMDH foi aplicada inicialmente a dados gerados por modelos teóricos, e depois aplicada a dados de operação do reator IEA-R1. O primeiro modelo teórico desenvolvido foi um modelo teórico de trocador de calor, escolhido por ser um sistema relativamente simples, cujas equações de transferência de calor que relacionam as variáveis do sistema podem ser obtidas analiticamente. A metodologia GMDH foi aplicada para estimativa do valor da potência térmica do trocador de calor. Esse modelo foi utilizado para estudos exaustivos da metodologia GMDH. Os aspectos estudados com esse modelo foram: precisão do método, normalização, influência do número de observações e nível de ruído. A seguir foi desenvolvido um modelo teórico do reator de pesquisas do Ipen IEA-R1. As equações do modelo teórico desenvolvido foram baseadas em parâmetros físicos e operacionais do reator IEA-R1. Esse modelo teórico é mais complexo do que o modelo do trocador de calor, e foi desenvolvido de forma a possibilitar a geração de dados com diferentes valores de ruído, além de possibilitar a inclusão de falhas aos dados gerados. Com esse modelo teórico do reator IEA-R1 foi desenvolvido um sistema de monitoração e diagnóstico completo, compreendendo as etapas de desenvolvimento da estrutura do modelo GMDH, monitoração de dados sem falha e dados com falha e, a partir dos resultados da monitoração de dados com falhas, determinação das regras do sistema de diagnóstico.

Os resultados obtidos nos estudos da metodologia GMDH para monitoração e detecção de falhas em modelos teóricos propiciaram uma base para a aplicação da metodologia aos dados de operação do reator IEA-R1.

Para o desenvolvimento do Sistema de Monitoração e Detecção de Falhas do reator IEA-R1 foram utilizados dados de operação fornecidos pelo Sistema de Aquisição de Dados, que fornece leituras de 57 variáveis de operação. Estas variáveis podem ser

agrupadas em variáveis de processo (compreendendo as variáveis de temperatura e vazão) e variáveis nucleares (potência nuclear, posição de barras e taxas de dose).

Foram desenvolvidos três modelos GMDH utilizando os dados de operação: o primeiro modelo utilizou as mesmas variáveis utilizadas no modelo teórico do reator, ou seja, as variáveis de temperatura e vazão, num total de 10 variáveis, e foi chamado de modelo 1; o segundo modelo foi desenvolvido considerando-se algumas variáveis nucleares e três variáveis de temperatura, num total de 9 variáveis, e foi chamado de modelo 2. Finalmente, foi desenvolvido o terceiro modelo GMDH, considerando todas as variáveis possíveis. Apenas algumas foram excluídas por serem consideradas não relevantes ao sistema de monitoração. O terceiro modelo GMDH possui 38 variáveis, e foi chamado de modelo 3. Os três modelos foram desenvolvidos para uma determinada semana de operação e foram utilizados para a monitoração de dados de duas outras diferentes semanas de operação, mostrando ótimos resultados. Além disso, os resultados de monitoração dos três modelos GMDH foram comparados entre si, sendo que o modelo 3 mostrou-se o melhor modelo pois apresentou os menores valores de resíduos nas estimativas das variáveis. Isto demonstra a capacidade da metodologia GMDH de selecionar automaticamente as variáveis de entrada do modelo.

A última etapa de desenvolvimento do sistema de monitoração e detecção de falhas é o diagnóstico. Para o estabelecimento das falhas, foram escolhidas as variáveis de temperatura, e foi determinado um valor de resíduo acima do qual é considerado falha. O valor escolhido foi o valor de limite de erro de calibração do medidor de temperatura. O resultado da monitoração de dados com falha conhecida foi utilizado para determinar as regras do sistema de diagnóstico. Para que o sistema de diagnóstico ficasse mais robusto e abrangente, foi desenvolvido um sistema utilizando a lógica nebulosa (lógica Fuzzy).

9.1 Recomendações para trabalhos futuros

- Fazer um novo modelo GMDH para o reator de pesquisas do Ipen IEA-R1 utilizando uma nova base de dados que contenha várias semanas de operação na mesma condição de potência.
- Comparar os resultados desse trabalho com redes neurais. Paralelamente a esse trabalho está sendo feito um trabalho de monitoração e detecção de falhas no reator IEA-R1 utilizando redes neurais. Esse trabalho também utiliza os dados do modelo teórico do reator IEA-R1 e dados de operação.
- Uma das conclusões desse trabalho foi a forte dependência do nível de ruído nos dados de entrada e o valor de RMIN do modelo GMDH. Isso foi comprovado com estudos teóricos e verificado com dados de operação principalmente na monitoração das variáveis de radiação (R1 a R14), que apresentaram valores altos de resíduos. Pode-se tentar melhorar isso, fazendo um tratamento do ruído através de um pré-processamento dos sinais, diminuindo o ruído antes de iniciar a modelagem GMDH.
- Ampliar o estudo das falhas. Pode-se simular falhas em outros sensores, além dos sensores de temperatura.
- Aperfeiçoar o sistema fuzzy de diagnóstico, incluindo mais regras, que englobem maior número de situações.
- Implementação nas usinas nucleares brasileiras. A implementação da metodologia não implica em nenhuma modificação no sistema de instrumentação existente.
- Continuidade do Banco de Dados em Access. Atualização do banco de dados através da incorporação dos dados de operação de 2003 a 2005.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 3^o WORKSHOP DO PROGRAMA IRIS, BRASIL, Comissão Nacional de Energia Nuclear, São Paulo, Brasil, 05/02/2002.
- 2 AKSENOVA, T. I. and YURACHKOVSKY, Yu. P. A Characterisation at Unbiased Structure and Conditions of Their J-Optimality, *Sov. J. of Automation and Information Sciences*, vol. 21, No. 4, 1988, pp.36-42.
- 3 ALTUG, S; CHOW, M. Y.; TRUSSELL, H. J. Fuzzy inference systems implemented on neural architectures for motor fault detection and diagnosis. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 1999, v. 46, Iss 6, p. 1069-1079.
- 4 BASSEL, W. S. *Balanco de Massa e Energia do Circuito Secundário do Reator IEA-R1*, Relatório Técnico, IPEN, 1996.
- 5 BISSESSUR, Y; MARTIN, E. B.; MORRIS, A. J. Monitoring the performance of the paper making process. *Control Engineering Practice*. 1999, v. 7, Iss 11, p. 1357-1368.
- 6 BUENO, E. I. *Manual do Banco de Dados do reator IEA-R1*. Relatório Técnico, IPEN, 2002.
- 7 *Building GUIs with MATLAB Version 5*, The MATH WORKS Inc, MA, USA, 1997.
- 8 CARELLI, M. D. et al. IRIS: Proceeding Towards the Preliminary Design. ICONE10 10th International Conference on Nuclear Engineering, Arlington, VA, April 14-18, 2002.
- 9 CARNEIRO, A. L. G. *Desenvolvimento de sistema de monitoração e diagnóstico aplicado a válvulas moto-operadas utilizadas em centrais nucleares*. 2003. Tese (Doutorado) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo.
- 10 CARNEIRO, A. L. G.; DA SILVA, A. A.; UPADHYAYA, B. R. Development of an itegrated condition monitoring system for motor-operated valves for brasilian nuclear power plants. In : Maintenance and Reliability Conference, May, 2001, Gatlingburg TN USA. *Proceedings* of MACON, Gatlingburg TN USA, 2001.
- 11 Convênio Bilateral: Conselho Nacional de Pesquisas – CNPq e National Science Foundation – NSF. *Sistemas de Monitoração e Diagnóstico Utilizando Métodos Avançados de Processamento de Informação*. Processo N^o : 910005/98-2.
- 12 DA SILVA, A. A.; UPADHYAYA, B. R. Rotating Machinery Monitoring and Diagnosis Using Short-Time Fourier Transform and Wavelet Techniques. *Proceedings*. MARCON 97, v. 1, p.14.01-14.15, May 1997.

- 13 ECIL Produtos Especiais. Ecil Temperatura Industrial, Ecil Met Tec e Ecil Informática. Disponível em <<http://www.ecil.com.br/pt/sq/home.asp>>. Acesso em: 4 de outubro de 2005.
- 14 ERBAY, A. S.; UPADHYAYA, B. R. A Fuzzy Logic Decision Making for Multi-Model Signal Validation Algorithms, @ op cit., v. 2, p. 1337-1341, May 1996.
- 15 FARLOW, S. J. *Self-organizing Methods in Modeling: GMDH-type Algorithms*. New York: M. Dekker, 1984.
- 16 FERREIRA, P. B. *Incipient Fault Detection and Isolation of Sensors and Field Devices*. Tese (Doutorado) - University of Tennessee, August 1999.
- 17 *Fuzzy Logic Toolbox for use GUIs with MATLAB Version 5*, The MATH WORKS Inc, MA, USA, 1997.
- 18 GMDH Group Method of Data Handling. Desenvolvido pelo National Institute for Strategic Studies, International Center for Information Technologies and Systems of the National Academy of Sciences of Ukraine. Disponível em <http://www.gmdh.net/GMDH_abo.htm>. Acesso em: 14 de junho de 2005.
- 19 GONÇALVES, I. M. P.; TING, D. K. S. Heat Exchanger Data Driven Model Using GMDH Methodology. *Proceedings*. The International Conference on Integrated Modeling and Analysis in Applied Control and Automation, IMAACA 2004, Genoa, Italy, October 28-30 2004.
- 20 GONÇALVES, I. M. P.; TING, D. K. S.; FERREIRA, P. B.; UPADHYAYA, B. R. Monitoring an Experimental Reactor Using the Group Method of Data Handling Approach, *Nuclear Technology*, v. 149, p.101-109, 2005.
- 21 GRIBOK, A.; HINES, J. W. *Density Estimation, Kernel Regression, and Regularization*, Course Info, 2000.
- 22 IKEDA, S.; OCHIAI, M.; SAWARAGI, Y. Sequential GMDH Algorithm and its Application to River Flow Prediction. *IEEE Trans. Syst. Man Cybern.* SMC – 6, 473, 1976.
- 23 INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES (IPEN). *Dados Operacionais do Reator IEA-R1 Arranjo 214 e 215 Mês Abril Ano 2004*. Abril 2004.
- 24 INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES (IPEN). *Relatório de Análise de Segurança do reator de pesquisas do Ipen IEA-R1 (RAS)*, 2005.
- 25 INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (IAEA). *Modern Instrumentation and Control for Nuclear Power Plants: a Guidebook*. Technical Reports Series No. 387, Vienna, 1999.
- 26 IVAKHNENKO, A. G. Heuristic Self-organization in Problems of Engineering Cybernetics. *Avtomatika*, 6:207, 1970.
- 27 IVAKHNENKO, A. G. Polynomial Theory of Complex Systems. *IEEE Trans. Syst. Man Cybern.* 4:364, 1971.

- 28 IVAKHNENKO, A. G. Self-teaching Systems of Recognition and Automatic Control. *Tekhnika*, 392, 1969.
- 29 IVAKHNENKO, A. G. The group method of data handling - A rival of the method of stochastic approximation. *Avtomatika*, No. 3, 1968.
- 30 IVAKHNENKO, A. G.; DIMITROV, V. D.; MGELADSE, S. G. The probability algorithms of the group method of data handling in the problem of the prediction of random events. *Avtomatika*, No. 3, 1969.
- 31 IVAKHNENKO, A. G.; KONOVALENKO, V. B.; TULUPCHUK, Yu. M.; TIMCHENKOI, K. The group method of data handling in the problem of pattern recognition and decisions making. *Avtomatika*, No. 5, 1968.
- 32 IVAKHNENKO, A. G.; KOPPA, Yu. S.; IVAKHNENKO, N. A. : The group method of data handling in the problem of identification of the multiextremum plant. *Avtomatika*, No. 2, 1969.
- 33 IVAKHNENKO, A. G.; YARACHKOVSKIY, Yu. P. Self-organization at a System of Complex Models. *Radio and Signal*. Moscou, 1981.
- 34 KERN, D. Q. *Process Heat Transfer*, Mc Graw-Hill Book Company, Inc, New York, USA, 1950.
- 35 KONDO, J. *Air Pollution*. Korona Company, Tokyo, 1975.
- 36 MACIEJOWSKY, J. M. *The Modeling Systems with Small Observation Sets*. Lect. Notes Control Inf. Sci. 10:242, 1978.
- 37 *Manual on the use of thermocouples in temperature measurement* ASTM STP 470B. American Society for Testing and Materials. February 1983.
- 38 MARCH-LEUBA, J. A new paradigm for automatic development of highly reliable control architectures for nuclear power plants. Progress Report, Report No. ORNL/TM-2000/265, Oak Ridge National Laboratory, 2000.
- 39 MESQUITA, R. N. *Classificação de defeitos em tubos de gerador de vapor de plantas nucleares utilizando mapas auto-organizáveis*. 2002. Tese (Doutorado) Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.
- 40 MESQUITA, R. N.; CABRAL, E. L. L.; UPADHYAYA, B. R. Classification of Steam Generator Tube Defects Using Linear predictive coding and a self-organizing neural network. *Proceedings*. Maintenance and Reliability Conference (MARCON) , Gatlinburg, 2001.
- 41 OMEGA 1987 *Complete Temperature Measurement Handbook and Encyclopedia*.
- 42 PENHA, R. M. L. *Análise de sinais em regime transiente aplicando a técnica de wavelet*. 1999. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo.

- 43 PENHA, R. M. L.; DA SILVA, A. A.; TING, D. K. S.; DE OLIVEIRA, J. M. Análise de sinais em regime transiente aplicando a técnica de wavelet. No XII Encontro de Física de Reatores ENFIR, Rio de Janeiro, outubro 2000. *Proceedings* do XII ENFIR.
- 44 Projeto de cooperação técnica da Agência Internacional de Energia Atômica (AIEA) Technical Cooperation Project No. BRA/4/048.
- 45 SAWARAGI, Y.; SOEDA, T.; TAMURA, H. Statistical Prediction os Air Pollution Levels Using Non-Physical Models. *Avtomatika*, 15:452, 1979.
- 46 SHANKAR, R. *The GMDH*. Dissertação (Mestrado) –University of Delaware, 1972.
- 47 SMITH, R.; DULLERUD, G. Modeling and validation of nonlinear feedback systems. *Robustness in Identification and Control*. v. 245, p. 87-101, 1999.
- 48 SNOWDEN, S. A.; UPADHYAYA, B. R.; CLINE, T. L. Automated Diagnosis of Motor-Operated Valves. *Proceedings*. MARCON 97, v. 2, p. 65.01-65.13, May 1997.
- 49 TAMURA, V.; KONDO, T. Large-Spatial Pattern Identification of Air Pollution by a Combined Source Receptor Matrix and Revised GMDH. *Proceedings*. IFAC Symp. Envirom. Syst. Planning, Design Control, 378, 1977.
- 50 UPADHYAYA, B. R.; BANKS, J. E.; ERBAY, A. S. Advanced Maintenance Technology, *P/Pm Technology*, v. 9, No. 2, p. 336-341, April 1996.
- 51 UPADHYAYA, B. R.; GONÇALVES, I. M. P. Detection and Isolation of Multiple Faults in Nuclear Plant Systems. *Proceedings*. American Nuclear Society Annual Meeting, San Diego, California, June 4-8, 2000.
- 52 UPADHYAYA, B. R.; GONÇALVES, I. M. P.; TING, D. K. S. Nuclear Power Plant Monitoring using Data-driven Modeling Techniques. *Proceedings*. Maintenance and Reliability Conference MARCON 2001, Gatlinburg, Tennessee, May 6-9, 2001.
- 53 UPADHYAYA, B. R.; KAVAKLIOGLU, K.; SILBER, A.; FERREIRA, P. B.; MCCLANAHAN, P. *Life Prediction of Temperature Detectors*. Research Report prepared for Rosemount, Inc., UTNE/RMT/95-08, December 1996.
- 54 UPADHYAYA, B. R.; NAGHEDOLFEIZI, M.; RAYCHAUDHURI, B. Residual Life Estimation of Plant Components, *P/PM Technology*, v. 7, No.3, p. 22-29, 1994.
- 55 UPADHYAYA, B. R.; YAN, W.; BEHRAVESH, M.M.; HENR, Y. G. An Automated Diagnostic Expert System for Eddy Current Analysis Using Applied Artificial Intelligence Techniques, *Proceedings* SMIRT-13 Post Conference Seminar on Applications of Intelligent Software Systems in Power Plant and Structural Engineering, São Paulo, Brazil, August 1995.
- 56 UPADHYAYA, B. R.; ZHAO, K.; LU, B. Fault Monitoring of Nuclear Power Plant sensor and field devices, *Progress in Nuclear Energy*, v. 43, No. 1-4, p. 337-342, 2003
- 57 *Using MATLAB Version 5*, The MATH WORKS Inc, MA, USA 1997.

- 58 YARACHKOVSKIY, Yu. P. Convergence of Multilayer GMDH Algorithms. *Sov. Autom. Control* 14:36, 1981.
- 59 YARACHKOVSKIY, Yu. P. Structural Modelling by Observation Sets. *Sov. Autm. Control*. 15: 1982.
- 60 YARACHKOVSKIY, Yu. P. The GMDH as an Effective Means for the Solution of the Structural Modelling Problem. *Sov. Autom. Control* 15: 1982.
- 61 ZADEH, L. A. Outline of a New Approach to the Analysis of Complex Systems and Decision Processes, **IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics**, vol. SMC3, No. 1, January 1973.



M23294



Ministério
da Ciência
e Tecnologia



Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares

Diretoria de Ensino & Informação Científica e Tecnológica

Av. Prof. Lineu Prestes, 2242 Cidade Universitária CEP: 05508-000

Fone/Fax(0XX11) 3816 - 9148

SÃO PAULO - São Paulo - Brasil

<http://www.ipen.br>

O Ipen é uma autarquia vinculada à Secretaria de Ciência, Tecnologia e Desenvolvimento Econômico e Turismo do Estado de São Paulo, gerida técnica, administrativa e financeiramente pela Comissão Nacional de Energia Nuclear, órgão do Ministério da Ciência e Tecnologia, e associada à Universidade de São Paulo.