



SISTEMA ESPECIALISTA BASEADO EM NÍVEIS PROGRESSIVOS DE
DIAGNÓSTICO PARA IDENTIFICAÇÃO DE ACIDENTES EM USINA NUCLEAR
PWR

Douglas Ribeiro Salmon

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Nuclear, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Nuclear.

Orientador: Roberto Schirru

Rio de Janeiro

Abril de 2013

SISTEMA ESPECIALISTA BASEADO EM NÍVEIS PROGRESSIVOS DE
DIAGNÓSTICO PARA IDENTIFICAÇÃO DE ACIDENTES EM USINA NUCLEAR
PWR

Douglas Ribeiro Salmon

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO
LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA
(COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE
DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE
EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA NUCLEAR.

Examinada por:

Prof. Roberto Schirru, D.Sc.

Prof. Eduardo Gomes Dutra do Carmo, D.Sc.

Prof. Cláudio Márcio do Nascimento Abreu Pereira, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

ABRIL DE 2013

Salmon, Douglas Ribeiro

Sistema Especialista Baseado em Níveis Progressivos de Diagnóstico para Identificação de Acidentes em Usina Nuclear PWR/ Douglas Ribeiro Salmon. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2013.

VIII, 96 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Roberto Schirru

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Nuclear, 2013.

Referências Bibliográficas: p. 93 - 96.

1. Sistema especialista. 2. Identificação de acidentes em usina nuclear. I. Schirru, Roberto. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Nuclear. III. Título.

AGRADECIMENTOS

A minha esposa Vanessa e aos meus filhos Rodrigo e Felipe, pelo carinho e amor, que fortalecem a minha vontade de seguir em frente.

Ao professor Schirru, por transmitir seu conhecimento com entusiasmo. Por compreender as dificuldades, incentivar e cobrar na hora certa.

Aos amigos Frederico e Alexandre, por ajudarem a superar os desafios. Por nunca terem dormido ao volante na Rio-Santos.

Ao Fis. Mázzaro, Eng. Anselmo e Eng. Fabiano, que apoiaram a decisão pessoal de fazer o mestrado.

A todos os colegas do Programa de Engenharia Nuclear que contribuíram para este trabalho, esclarecendo dúvidas, revisando textos, sugerindo e fornecendo material de estudo.

Aos colegas do Centro Avançado de Treinamento em Simulador, Marques, Rodrigues e Leonardo, pela gentileza em ajudar na aquisição dos dados de simulador.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

SISTEMA ESPECIALISTA BASEADO EM NÍVEIS PROGRESSIVOS DE
DIAGNÓSTICO PARA IDENTIFICAÇÃO DE ACIDENTES EM USINA NUCLEAR
PWR

Douglas Ribeiro Salmon

Abril/2013

Orientador: Roberto Schirru

Programa: Engenharia Nuclear

Este trabalho desenvolve um sistema especialista que efetua a identificação de acidentes e operações anormais em tempo real em uma usina nuclear PWR. O sistema monitora 64 parâmetros da planta e identifica quando a mesma entra em operação anormal, iniciando o processo de diagnóstico do evento. A identificação é realizada em quatro níveis progressivos de diagnóstico, até que seja encontrado o tipo específico de acidente, definido no manual de operação de emergência, e a variante do acidente em questão. Sua base de conhecimento acumula as informações técnicas e a heurística utilizadas na identificação de acidentes pelos operadores licenciados. O sistema foi submetido a testes em simulador e os resultados demonstraram a eficácia do sistema no diagnóstico dos eventos propostos.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

EXPERT SYSTEM BASED ON PROGRESSIVE LEVELS OF DIAGNOSIS FOR
ACCIDENT IDENTIFICATION IN A PWR NUCLEAR POWER PLANT

Douglas Ribeiro Salmon

April/2013

Advisor: Roberto Schirru

Department: Nuclear Engineering

This work develops an expert system that performs the identification of accidents and abnormal operations in real time in a PWR nuclear power plant. The system monitors 64 parameters and identifies when the plant goes into abnormal operation, starting the process of diagnosis. The identification is performed in four progressive levels of diagnosis until the specific type of accident and its variant, set in the emergency operation manual, are found. The system's knowledge base accumulates technical information and heuristic used by licensed operators in identifying accidents. The model has been tested in a simulator and the results demonstrated the effectiveness of the diagnosis of proposed events.

ÍNDICE

1.	INTRODUÇÃO	1
2.	FUNDAMENTOS TEÓRICOS	7
2.1.	Representação e inteligência	7
2.2.	Linguagem Proposicional	8
2.3.	Sistemas Especialistas	10
2.4.	Raciocínio na incerteza	16
2.5.	Linguagem de Programação Lisp	21
3.	IDENTIFICAÇÃO DE ACIDENTES E OPERAÇÕES ANORMAIS	24
3.1.	Introdução	24
3.2.	Identificação de Acidentes e Operações Anormais na Usina de Angra 2	26
3.3.	Acidentes Postulados	30
3.4.	Técnicas de Inteligência Artificial Aplicadas ao Diagnóstico de Acidentes	36
4.	PROTÓTIPO DE SISTEMA ESPECIALISTA PARA IDENTIFICAÇÃO DE ACIDENTES	40
4.1.	Introdução	40
4.2.	Escopo dos Acidentes Seleccionados	41
4.3.	Protótipo de Sistema Especialista Proposto	45
4.4.	Implementação do Modelo de Sistema Especialista Proposto	57
5.	RESULTADOS E ANÁLISES	60
5.1.	Introdução	60
5.2.	Cenários de Teste Utilizados	61
5.3.	Diagnósticos dos Cenários de Teste	66
5.4.	Análise dos Resultados	83

6.	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	89
6.1.	Conclusões	89
6.2.	Sugestões para Trabalhos Futuros	91
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	93

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

As usinas nucleares de Angra 1 e Angra 2 produzem energia elétrica mantendo rigorosos padrões internacionais de segurança e altos índices de disponibilidade. Ao longo dos anos de operação, ambas as usinas jamais enfrentaram um acidente ou operação anormal que colocasse em risco seus trabalhadores, a população local ou o meio ambiente. Contribuem para a operação segura tanto o projeto das usinas como o profissionalismo de seus empregados, que são continuamente incentivados a trabalhar em linha com os princípios formadores da Cultura de Segurança da empresa. Na busca contínua por padrões cada vez mais elevados na segurança da operação, as usinas brasileiras seguem as políticas internacionais de aprimoramento contínuo de processos, sistemas e interfaces.

Em vários países, as empresas operadoras de usinas nucleares, em parceria com universidades e centros de pesquisas, trabalham no desenvolvimento de novas ferramentas que possam ser aplicadas para aumentar os níveis de segurança e confiabilidade da operação das usinas. Ao longo dos anos, têm sido realizados diversos trabalhos de pesquisa para o desenvolvimento de sistemas computacionais que possam auxiliar as equipes de operadores no diagnóstico, em tempo real, de anormalidades e acidentes.

Desde o início da década de 80, pesquisas têm sido conduzidas para aplicar as diferentes técnicas de inteligência artificial no desenvolvimento de sistemas avançados de suporte aos operadores, capazes de fornecer informações inteligentes para diagnóstico e monitoração da planta, em tempo real, de forma a aprimorar a supervisão e a segurança da operação [1].

Durante a década de 1980 e início da década de 1990, os sistemas desenvolvidos utilizando inteligência artificial para processos de diagnóstico utilizavam principalmente duas técnicas: sistemas especialistas e redes neurais [2]. A partir da década de 1990 sistemas híbridos das duas ferramentas também começaram a ser estudados [3]. Ainda

no mesmo período, sistemas de lógica nebulosa e algoritmos genéticos passam a ser explorados como ferramentas para aplicações de monitoração em tempo real e diagnóstico em usinas nucleares.

Atualmente, além da combinação das técnicas já sedimentadas para a criação de sistemas híbridos, aplicações de outras técnicas de inteligência artificial em identificação de transientes têm sido pesquisadas. O algoritmo PSO (Particle Swarm Optimization) apresenta bons resultados na otimização do problema de identificação de transientes em usinas nucleares [4]. O Algoritmo Quântico Evolucionário foi aplicado na identificação de transientes e demonstrou ser uma ferramenta de otimização viável em espaços de busca contínuos e discretos [5].

Todas as diferentes formas de abordagem do problema de diagnóstico de acidentes, operações anormais ou transientes têm em comum o objetivo de prover as equipes de sala de controle com informações confiáveis, claras e inteligentes de um evento em andamento, fortalecendo o processo de tomada de decisão das equipes de operação durante as operações anormais e acidentes postulados.

Na usina de Angra 2, o processo de diagnóstico de acidentes e operações anormais está atualmente estabelecido em procedimentos escritos, os quais devem ser seguidos pelas equipes de operação durante as operações anormais que vierem a acontecer. Os operadores de sala de controle, antes de receberem autorização para operarem os controles da usina, passam por extenso treinamento, que inclui o estudo de todas as operações anormais, acidentes postulados e seus respectivos procedimentos de emergência. O estudo teórico é complementado por um treinamento prático em simulador dos cenários postulados nos manuais de emergência. Os operadores, após serem considerados aptos a trabalharem na sala de controle, devem cumprir um plano de treinamento contínuo, que inclui a prática em simulador de todos os cenários postulados.

Embora o alto nível de treinamento das equipes de operação de Angra 2 e o uso dos procedimentos de emergência levem ao diagnóstico correto dos eventos durante os exercícios de simulador, é preciso reconhecer que alguns cenários apresentam uma

grande quantidade de informações que as equipes devem processar e entender, enquanto caminham nos procedimentos de diagnóstico.

Este trabalho apresenta o estudo e o desenvolvimento de um protótipo de sistema computacional para diagnóstico em tempo real de acidentes e operações anormais para a usina de Angra 2. A proposta do trabalho é incorporar ao protótipo o conhecimento técnico utilizado pelas equipes de operação na identificação de acidentes, levando o sistema computacional a realizar o diagnóstico através de regras e heurísticas próximas àquelas utilizadas pelos operadores.

Será avaliada a capacidade de o protótipo efetuar os diagnósticos de um conjunto de acidentes selecionados, utilizando uma base de conhecimento operacional, e alcançar os mesmos resultados que seriam alcançados pelos operadores na utilização dos procedimentos de emergência. Isto implica em efetuar a identificação do evento em níveis progressivos de diagnóstico, desde o reconhecimento inicial de que a planta saiu das condições de operação normais, o enquadramento em grupos de acidentes pré-definidos nos procedimentos de operação, o acidente específico que está ocorrendo e seu procedimento específico e, por fim, a identificação da variante em andamento para aquele acidente.

Este trabalho tem como escopo inicial a identificação de três grupos de acidentes, definidos na árvore lógica de diagnóstico da usina de Angra 2:

- 1) Acidente com perda de refrigerante ou quebra de linha do secundário dentro da contenção;
- 2) Ruptura de Tubo de Gerador de Vapor (RTGV) com ou sem limites de radioatividade excedidos;
- 3) Quebra de linha de vapor principal fora da contenção;

Para a identificação dos acidentes, foram definidos quatro níveis de diagnóstico. O nível 1 (N1) identifica que a usina saiu das condições normais de operação. Se o modelo reconhecer que o transiente está dentro do conjunto de acidentes que o mesmo é capaz de diagnosticar, então é identificada uma condição de Operação Anormal. Se o modelo não conseguir identificar o transiente como sendo do seu escopo de diagnóstico, o mesmo declara Evento Não Identificado, uma resposta do tipo “Don’t Know”. O

nível 2 (N2) reconhece que o evento se enquadra em um dos três grupos de acidentes já mencionados. O nível 3 (N3) faz o diagnóstico de qual acidente está ocorrendo e qual Manual de Operação deve ser utilizado. São 13 possíveis acidentes neste nível. Cada um desses treze acidentes pode ser subdividido em diferentes casos, especificados nos manuais de emergência. O nível 4 (N4) identifica qual o caso está em evolução para o acidente específico. Para o escopo deste trabalho, são 27 casos, ou variantes, de acidentes possíveis no total.

Embora as equipes de operação realizem com sucesso os diagnósticos de acidentes em cenários de treinamento em simulador, a possibilidade de haver disponível um sistema avançado de diagnóstico que seja capaz de executar a identificação do evento, com alto grau de confiabilidade e em tempo real, concomitantemente ao diagnóstico efetuado pelos operadores, utilizando técnicas de inferência próximas das utilizadas por eles, representaria uma evolução significativa no processo de identificação de mau-funcionamentos, reforçando a segurança dos diagnósticos alcançados.

Um sistema computacional para diagnóstico em tempo real, com capacidade de monitoração e avaliação de uma grande quantidade de dados da planta em intervalos de tempo pequenos, quando comparados aos padrões humanos, se apresenta como uma potencial ferramenta para uso das equipes de operação, onde o diagnóstico alcançado pelo sistema pode ser aplicado para confirmar a identificação realizada pelos operadores. Os resultados deste trabalho pretendem demonstrar a viabilidade de tal ferramenta.

A técnica de inteligência artificial escolhida para o desenvolvimento do protótipo foi Sistema Especialista baseado em regras. A principal característica dos Sistemas Especialistas, que atende ao objetivo do trabalho, é a independência, dentro do sistema, da estrutura responsável por efetuar as inferências, chamada de motor de inferência, e o conjunto de informações técnicas estruturadas, que forma a base de conhecimento. Essa separação permite a alteração e expansão da base de conhecimento de forma prática e direta, sem que seja necessária nenhuma alteração no motor de inferência.

Para aplicações no campo de diagnóstico, outra característica importante dos Sistemas Especialistas é permitir a apresentação das explicações sobre suas conclusões. Todo o encadeamento de inferência realizado pode ser disponibilizado para o usuário, de forma que o mesmo possa verificar quais fatos e inferências levaram a determinadas conclusões.

Para apresentar o sistema computacional proposto, seus fundamentos teóricos, resultados e conclusões, esta dissertação foi dividida em seis capítulos descritos sumariamente a seguir.

O presente capítulo apresenta o contexto no qual o trabalho se encontra, um breve histórico da evolução das aplicações de inteligência artificial no diagnóstico de acidentes, o objetivo do trabalho, a técnica escolhida e uma descrição resumida de cada capítulo.

O capítulo 2 descreve as bases teóricas do trabalho. São apresentados alguns conceitos sobre representação do conhecimento e lógica proposicional. Em seguida, é descrita a técnica de Sistemas Especialistas e são apresentadas algumas abordagens sobre o raciocínio na incerteza. Por fim, a linguagem de programação utilizada no trabalho é apresentada.

No capítulo 3, o método de identificação de acidentes e operações anormais utilizado na usina de Angra 2 é discutido. O comportamento da planta durante alguns acidentes é detalhado. Por último, a evolução histórica das aplicações de técnicas de inteligência artificial ao problema de identificação de acidentes e operações anormais é apresentada.

O capítulo 4 descreve o conjunto de acidentes escolhido para teste do protótipo do sistema especialista. Em seguida, é apresentado o protótipo em si, com uma descrição de seus componentes. Por fim, a implementação do sistema será abordada, com uma discussão das principais funções desenvolvidas na linguagem de programação escolhida.

O capítulo 5 apresenta os resultados alcançados, descrevendo os testes submetidos ao sistema especialista. Os resultados de cada cenário gerado são discutidos e comparados com os diagnósticos esperados. Uma avaliação do conjunto de todos os resultados é realizada ao final.

O capítulo 6 apresenta as conclusões e propostas de trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Este capítulo apresenta uma breve descrição das bases teóricas que foram estudadas para o desenvolvimento deste trabalho. São apresentados inicialmente alguns conceitos sobre representação do conhecimento e lógica proposicional. Em seguida, são descritos os fundamentos de um sistema especialista baseado em regras e são apresentadas algumas abordagens sobre o raciocínio na incerteza. Por fim, são descritas certas características da linguagem de programação Lisp, utilizada neste trabalho.

2.1. Representação e Inteligência

A representação pode ser definida como a forma estruturada para se capturar os aspectos críticos da atividade inteligente para aplicação computacional. As três principais abordagens para representação são [6]: O Método Fraco para solução de problema; O Método Forte para solução de problema e; Abordagem baseada em Agentes.

A estratégia conhecida como Método Fraco tem o foco no desenvolvimento de solucionadores de problema genéricos com aplicação de heurísticas que utilizam pouco ou nenhum conhecimento específico do domínio-problema. O desafio imposto a esta abordagem está em encontrar heurísticas eficazes na solução de problemas de domínios variados, uma vez que, em geral, os métodos que são bem-sucedidos utilizam o conhecimento específico do problema.

Em contrapartida, o Método Forte faz uso intensivo de conhecimento específico do domínio-problema e geralmente requer grandes quantidades de conhecimento para ser efetivo. A aplicação de um solucionador de problema baseado neste método, por consequência, fica restrita ao domínio-problema em questão. O desafio nesta abordagem está em encontrar a forma mais eficiente de se adquirir, armazenar e utilizar uma grande quantidade de conhecimento específico.

Na representação do conhecimento em um Método Forte, dois aspectos prevalecem: (1) O conhecimento é estruturado de forma proposicional, sendo apresentado explicitamente, permitindo que um observador externo identifique uma descrição natural do conhecimento; (2) O comportamento de um sistema é determinado pelas proposições contidas na base de conhecimento e deve ser claramente consistente com o entendimento do significado das proposições [6].

Em seção posterior serão apresentados os principais conceitos da técnica de Sistema Especialista, uma aplicação do Método Forte de solução de problema.

A abordagem baseada em Agentes não utiliza uma base de conhecimento extensa e centralizada, tampouco faz uso de um sistema de inferência de propósito genérico. Sistemas baseados em agentes são desenvolvidos sobre o conceito de agentes distribuídos e autônomos, onde cada agente atua em seu contexto, realizando sua tarefa, não havendo necessidade de um controlador central. Os mesmos atuam colaborativamente entre si na solução do problema, comunicando tarefas, objetivos e processos. Robótica e jogos são exemplos de aplicações atuais dessa abordagem.

2.2. Linguagem Proposicional

A linguagem proposicional é talvez a forma mais simples de representação do conhecimento. Utilizando seus símbolos, palavras e sentenças, é possível representar e avaliar as propriedades e relações de um domínio-problema. Nesta seção será feita uma breve apresentação de sua sintaxe e semântica.

Os símbolos da linguagem proposicional são:

Símbolos proposicionais: P,Q,R,S... expressos em letras maiúsculas e denotam alguma proposição ou afirmação sobre o mundo, como “a janela está fechada” ou “atuado desarme do reator”.

Símbolos verdade: verdadeiro, falso.

Conectivos lógicos: $\wedge \vee \neg \rightarrow \leftrightarrow$

As sentenças proposicionais são formadas por esses símbolos e podem ser:

- *Símbolos* são sentenças (ex.: P, Q, falso...).
- *Negação de um símbolo* é uma sentença (ex.: $\neg P$).
- *Conjunção (E) e disjunções (OU)* de duas sentenças é uma sentença (ex.: $A \wedge \neg B, C \vee D$).
- *Implicação* de uma sentença em outra é uma sentença (ex.: $P \rightarrow Q$). P é o antecedente ou premissa e Q é chamado de conseqüente ou conclusão.
- *Equivalência* de duas sentenças é uma sentença (ex.: $P \wedge Q \leftrightarrow \neg S$).

Os símbolos () ou [] podem ser utilizados para agrupar símbolos e controlar ordem de avaliação.

Uma expressão complexa é uma sentença se é formada pelos símbolos legais e pelas regras acima. É também chamada de fórmula bem-formada [6].

A semântica define o significado das sentenças. Uma proposição representa uma afirmação sobre o mundo e pode ser verdadeira ou falsa, considerando o estado real do mundo. A atribuição de valores verdade (V ou F) para cada símbolo de uma sentença é uma interpretação da mesma. De outra forma, cada conjunto possível de valores verdade das proposições de uma sentença corresponde a uma interpretação diferente.

O valor de verdade das sentenças, ou sua interpretação, é determinado pelas regras [6]:

- O valor atribuído à *negação* $\neg P$ será F se P for V e vice-versa.
- O valor atribuído à *conjunção* $A \wedge B$ será V somente se ambos A e B forem V. Do contrário será F.
- O valor atribuído à *disjunção* $A \vee B$ será V se um dos disjuntores A ou B for V. Do contrário será F.
- O valor atribuído à *implicação* $A \rightarrow B$ será F somente quando a premissa for V e a conclusão for F. Do contrário será V.
- O valor atribuído à *equivalência* \leftrightarrow será V somente se os valores verdade de ambas as expressões forem os mesmos para todas as interpretações. Senão será F.

Os valores verdade para proposições compostas são dados através de tabelas-verdade que listam todos os valores verdade possíveis para cada proposição atômica e também os valores verdade da expressão para cada combinação possível. A tabela enumera assim todos os valores de interpretação possíveis para uma dada expressão.

Duas expressões são consideradas equivalentes se para todas as interpretações possíveis as mesmas têm os mesmos valores verdade. Por exemplo, é possível demonstrar que as duas expressões $(A \vee B) \leftrightarrow (\neg A \rightarrow B)$ possuem os mesmos valores na tabela verdade. Identidades desse tipo são úteis para transformar uma expressão em outra e essas transformações podem ser importantes em sistemas que fazem inferência de regras que têm que estar em determinada forma.

2.3. Sistemas Especialistas

2.3.1. Princípios e Estrutura Básica

Os sistemas especialistas foram desenvolvidos nos anos 60 como uma técnica de inteligência artificial para a solução de problemas complexos em um campo específico, como o diagnóstico médico de doenças. Os sistemas especialistas têm aumentado grandemente em popularidade desde sua introdução comercial no início dos anos 80. Hoje, sistemas especialistas são utilizados em negócios, ciência, engenharia, processos de fabricação e muitos outros campos onde existe um domínio do problema bem-definido. Muitas abordagens híbridas existem combinando sistemas especialistas com outras técnicas, como, por exemplo, algoritmos genéticos e redes neurais artificiais.

O professor Edward Feigenbaum da Universidade de Stanford [7], um dos pioneiros da tecnologia de sistemas especialistas definiu um sistema especialista como *“um programa de computador inteligente que utiliza conhecimento e procedimentos de inferência para resolver problemas que são difíceis o suficiente para requererem significativa perícia humana para a solução”*. Ou seja, um sistema especialista é um sistema computacional que emula a habilidade de decisão de um especialista humano. O termo “emular” significa que o sistema especialista é desenvolvido para atuar, em todos os aspectos, como um especialista humano.

Os sistemas especialistas fazem uso intensivo de conhecimento especializado para resolver problemas no nível de um especialista humano. Um especialista é uma pessoa que tem perícia em certa área. O especialista tem conhecimento ou habilidades especiais que não são conhecidas ou não estão disponíveis para a maioria das pessoas e pode resolver problemas de um campo específico que a maioria das pessoas não consegue resolver ou pode resolvê-los de forma mais eficiente [7].

O conhecimento armazenado nos sistemas especialistas pode ser adquirido a partir de um perito ou grupo de peritos, ou de conhecimento disponível em literatura especializada. O conhecimento do sistema pode incluir aspectos teóricos e práticos, uma vez que especialistas humanos em geral aumentam seu próprio entendimento teórico de um domínio-problema com truques, atalhos e heurísticas adquiridas através da experiência profissional, os quais podem ser transferidos para a base de conhecimento do sistema.

Os termos sistema especialista, sistema baseado em conhecimento e sistema especialista baseado em conhecimento são frequentemente utilizados como sinônimos.

Um dos fundamentos da teoria que envolve o desenvolvimento dos sistemas especialistas é a separação entre a base de conhecimento e o programa que executa as inferências sobre esta base. A figura 1 ilustra a estrutura simplificada de um sistema especialista baseado em conhecimento, retratando a inter-relação entre os componentes do sistema [8].

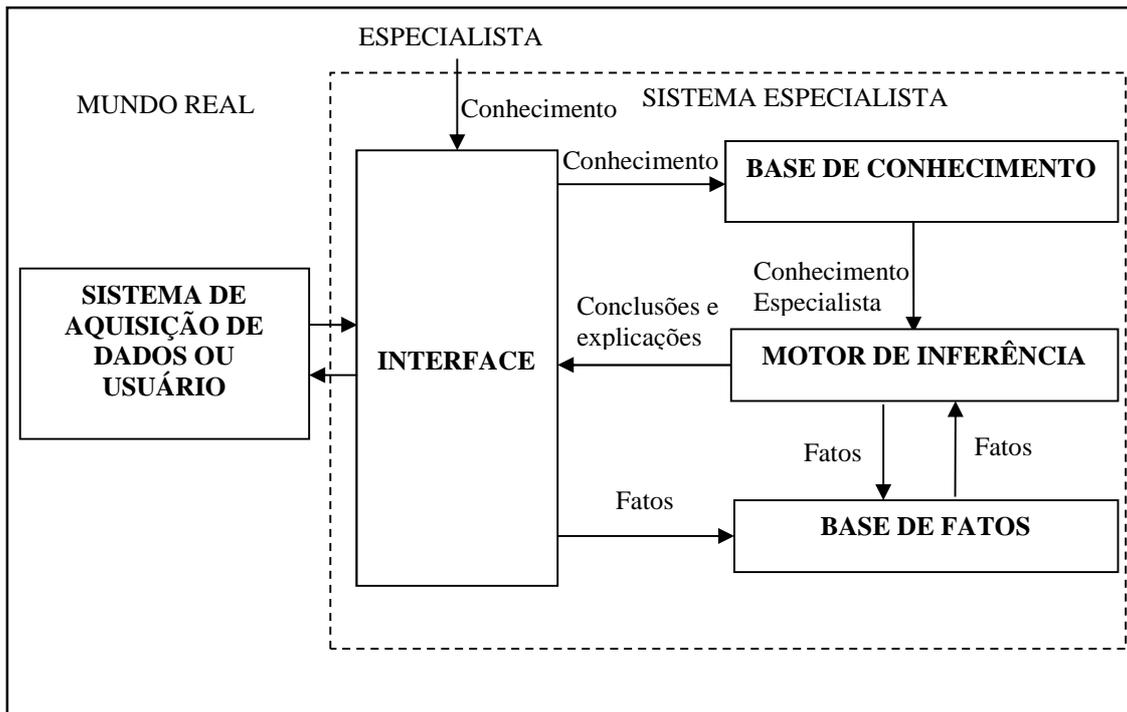


Figura 1 – Estrutura Básica de um Sistema Especialista

O usuário ou um sistema de aquisição de dados supre fatos ou outra informação para o sistema especialista através da interface. O sistema especialista responde ao usuário com conhecimento especialista na forma de conclusões, diagnósticos, explicações ou perguntas.

A base de conhecimento pode ser considerada como o principal componente do sistema especialista. Ela armazena o conhecimento teórico e prático do domínio-problema particular. Em um sistema especialista baseado em regras este conhecimento é comumente representado na forma de regras do tipo *Se...então...* A base de conhecimento pode armazenar tanto conhecimento genérico como informações de casos específicos do domínio-problema.

O motor de inferência aplica o conhecimento para a solução dos problemas reais. Ele é o componente que efetua a busca da solução do problema, “raciocinando” sobre as verdades apresentadas na base de fatos, tomando como referência o conhecimento armazenado na base de conhecimento. O motor de inferência pode ser entendido como um intérprete deste conhecimento e as inferências efetuadas alteram a base de fatos.

Os sistemas especialistas possuem inúmeras vantagens. Talvez a mais notória seja a independência entre a base de conhecimento e o motor de inferência. Isto facilita a adição ou remoção de informação específica do problema da base de conhecimento, sem que seja necessário alterar o motor de inferência [2]. Outras vantagens que podem ser destacadas são a capacidade de dar explicação e a resposta rápida. O sistema especialista pode explicar em detalhes o raciocínio que levou à conclusão. Isto aumenta a confiança de que a decisão correta foi tomada. Respostas rápidas ou em tempo real podem ser necessárias para algumas aplicações [7].

2.3.2. Base de Conhecimento de Sistemas Baseados em Regras

O tipo mais popular de sistema especialista é o sistema baseado em regras. Ao invés de representar o conhecimento de uma forma declarativa estática (como um conjunto de afirmações verdadeiras), os sistemas baseados em regras representam o conhecimento em termos de regras múltiplas para especificar o que deve e o que não deve ser concluído em diferentes situações [7].

Neste sistema, o conhecimento é moldado como declarações do tipo “Se (condição), Então (conseqüência)”. Quando a parte condicional de uma regra é satisfeita, a conseqüência é assumida ser verdadeira. Como exemplo de regra:

Se Fato A E Fato B Então Fato C
ou
 $Fato A \wedge Fato B \rightarrow Fato C$

Onde fato A e fato B são os antecedentes que, se verdadeiros, geram o conseqüente fato C. Múltiplos antecedentes são agrupados pelos conectores lógicos AND, OR e NOT.

Os conseqüentes das regras podem ser gerados com certeza ou com certa probabilidade p . As cláusulas de condição e conseqüência das regras podem ser representadas por relações exatas ou levando em consideração a incerteza, dependendo do tipo do mecanismo de inferência utilizado pelo sistema de diagnóstico.

2.3.3. Motor de Inferência de Sistemas Baseados em Regras

Em um sistema baseado em regras, o motor de inferência determina quais regras são satisfeitas pelos fatos. Dois métodos gerais de inferência são comumente utilizados como estratégia para solução de problema: encadeamento para frente (*forward chaining*) e encadeamento para trás (*backward chaining*).

Um sistema de encadeamento para frente começa com os fatos inicialmente conhecidos e utiliza as regras para tirar novas conclusões ou tomar certas ações. O motor de inferência realiza a verificação de quais regras são satisfeitas pelos fatos presentes de acordo com a repetição dos seguintes passos (figura 2) [8]:

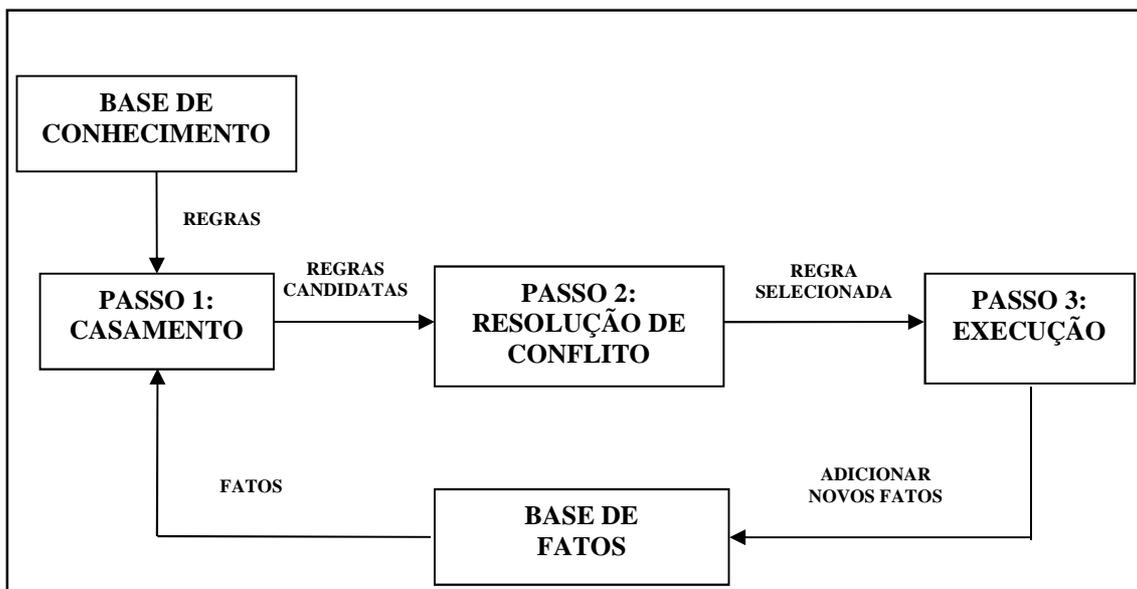


Figura 2 – Processo de Inferência em um Encadeamento para Frente

Passo 1 – Casamento: Este passo se constitui na comparação dos fatos presentes na base de fatos (*working memory*) com os antecedentes das regras da base de conhecimento. As regras cujos antecedentes forem verdadeiros, satisfazendo os fatos presentes, são selecionadas para um subconjunto de regras chamado de conjunto de conflito.

Passo 2 – Resolução de Conflito: Uma das regras do conjunto de conflito é selecionada para ser “queimada”. Queimar uma regra significa executar a ação existente

no seu termo conseqüente, alterando a base de fatos. A estratégia para resolução de conflito pode ser simples como escolher a primeira regra que satisfizer os fatos, escolher a regra de maior preferência de acordo com uma hierarquia de regras predefinida, ou pode ser complexa envolvendo heurísticas elaboradas para a seleção de regras.

Passo 3 – Execução: A regra selecionada no passo anterior é queimada, gerando novos fatos.

Este processo se repete enquanto os fatos presentes possibilitarem a queima de regras gerando novas ações e novas conclusões, evoluindo a busca na direção da solução do problema proposto.

Um sistema de encadeamento para trás, também conhecido como guiado por objetivo, começa com alguma hipótese ou objetivo que se está tentando provar, e mantém a procura por regras que permitam que a hipótese seja comprovada verdadeira. De início, a base de fatos conhecidos é vazia, e o sistema verifica se as conclusões das regras (conseqüentes) casam com o objetivo, selecionando uma regra e colocando suas premissas (antecedentes) na base de fatos. Isto corresponde a decompor o objetivo do problema em subobjetivos. O processo continua e, à medida que as regras são selecionadas, de acordo com seus conseqüentes, suas premissas vão se tornando os novos objetivos que devem ser casados com as conclusões das regras existentes.

O sistema, desta forma, trabalha para trás, a partir de um objetivo inicial, até que todos os subobjetivos da base de fatos sejam conhecidos como verdadeiros, indicando que a hipótese foi verificada. Portanto, a busca para trás em um sistema especialista corresponde à sistemática humana de testar hipóteses para a solução do problema.

A próxima seção apresenta alguns conceitos básicos sobre o raciocínio na incerteza. A habilidade de os sistemas especialistas lidarem com a incerteza de forma similar a uma pessoa é uma das suas grandes vantagens e a teoria da probabilidade é a base para alguns métodos de raciocínio na incerteza aplicados a sistemas especialistas.

2.4. Raciocínio na Incerteza

Os métodos dedutivos chamados de raciocínio exato lidam com fatos exatos e alcançam conclusões exatas, que seguem esses fatos. Entretanto, em problemas onde os fatos ou o conhecimento são imprecisos ou incompletos, o raciocínio exato não é aplicável. Essas situações exigem a utilização de raciocínio inexato onde conclusões úteis são alcançadas a partir de evidências incertas.

A incerteza pode ser considerada como a ausência de informação adequada ou suficiente para tomada de decisão garantidamente correta. Existe uma variedade de métodos que lidam com a incerteza, cada um deles possui vantagens e desvantagens e entendê-las é um passo importante para modelar um sistema especialista específico a uma dada aplicação.

Algumas ferramentas para a criação de sistemas especialistas já possuem funções internas desenvolvidas para aplicar teorias de raciocínio incerto. A decisão pela utilização de ferramentas customizadas deve ser precedida pela avaliação de qual método é o mais adequado ao domínio-problema e de qual é a melhor forma de implementá-lo. É possível que a implementação mais adequada seja utilizar um determinado método em algumas regras particulares ao invés da utilização genérica da ferramenta customizada para todo o sistema [7].

2.4.1 Probabilidade

A mais antiga ferramenta para solução de problemas envolvendo incerteza é a probabilidade. Probabilidade é uma forma quantitativa de lidar com a incerteza. A teoria da probabilidade clássica foi primeiro proposta por Pascal e Fermat em 1654. Desde então, a probabilidade tem sido amplamente utilizada e vários ramos novos têm sido desenvolvidos.

A teoria da probabilidade emprega um rol de conceitos e definições que formam a base de sua linguagem, dos quais se destacam:

- *Experimento aleatório* – ao ser repetido nas mesmas condições é impossível prever o resultado.

- *Experimento determinístico* – ao ser repetido nas mesmas condições, conduz ao mesmo resultado.

- *Espaço amostral* – conjunto de todos os possíveis resultados de um experimento aleatório.

- *Ponto amostral ou elemento* – cada resultado possível em um experimento aleatório.

- *Evento* – um subconjunto do espaço amostral.

- *Eventos mutuamente exclusivos* – Não possuem um ponto amostral em comum. São eventos onde a ocorrência de um deles não influencia a ocorrência do outro.

- *Variável aleatória* – pode ser entendida como uma função que associa elementos do espaço amostral a valores numéricos.

- *Probabilidade incondicional ou probabilidade a priori* -. Dado um espaço amostral finito Ω , não vazio, e supondo que cada subconjunto elementar de Ω é igualmente provável, então, para qualquer evento A contido em Ω a probabilidade de A é definida como:

$$P(A) = \frac{n}{N}, \text{ onde } n \text{ é o número de elementos favoráveis a A e } N \text{ é o número de}$$

elementos possíveis.

- *Probabilidade condicional* – probabilidade de um evento A, dado que um evento B ocorreu, é chamada de probabilidade condicional. É definida como:

$$P(A|B) = \frac{P(A \cap B)}{P(B)} \text{ para } P(B) \neq 0$$

- *Axioma 1* - $0 \leq P(E) \leq 1$. Este axioma define que as probabilidades possíveis de um dado evento E estão entre 0 e 1, onde um evento certo possui probabilidade 1 e um evento impossível possui probabilidade 0.

- *Axioma 2* - $\sum_i P(E_i) = 1$. A soma das probabilidades de todos os eventos mutuamente exclusivos é igual a 1.

- *Axioma 3* - $P(E_1 \cup E_2) = P(E_1) + P(E_2)$, onde E_1 e E_2 são eventos mutuamente exclusivos.

Na linguagem proposicional, uma proposição pode admitir apenas dois valores de verdade: verdadeiro ou falso. Quando há incerteza e a proposição não pode ser

declarada verdadeira ou falsa com segurança, a probabilidade é utilizada para denotar um chamado grau de crença da proposição.

O conceito de probabilidade incondicional ou *a priori* associado a uma proposição *a* é o grau de crença acordado para a proposição na ausência de quaisquer outras informações e é representada por $P(a)$ [9]. Por exemplo, o grau de crença de que uma pessoa qualquer esteja com uma doença A, sem que haja qualquer outra informação prévia, poderia ser 0,1.

$$P(\text{doença A} = \text{verdadeiro}) = 0,1 \text{ ou } P(\text{doença A}) = 0,1$$

Um grau de crença do mesmo evento anterior, condicionado a uma evidência prévia *b* “sintoma B”, $P(a|b)$, seria:

$$P(\text{Doença A} / \text{Sintoma B}) = 0,8$$

Nos casos práticos, geralmente as informações probabilísticas estão disponíveis sob a forma $P(\text{efeito}|\text{causa})$. Por exemplo, a comunidade médica tem dados estatísticos de que em 50% dos casos conhecidos da doença A ocorre o sintoma B:

$$P(\text{Sintoma B} / \text{Doença A}) = 0,5$$

Por outro lado, para o diagnóstico médico, o interesse pode estar em saber a probabilidade condicional inversa, ou seja, saber qual a probabilidade de um paciente com sintoma B estar com a doença A, $P(\text{Doença A} / \text{Sintoma B})$. Para o cálculo dessa probabilidade utiliza-se a regra de Bayes:

$$P(b|a) = \frac{P(a|b)P(b)}{P(a)}$$

Portanto, quando existirem dados estatísticos disponíveis ou boas estimativas para os três termos do lado direito da equação, a probabilidade desejada pode ser calculada.

A regra de Bayes é comumente utilizada para análise de árvores de decisão em negócios e em ciências sociais. O método de tomada de decisão Bayesiana também foi aplicado no sistema especialista PROSPECTOR, desenvolvido para decidir sobre a viabilidade econômica de sítios para exploração mineral [7].

Os métodos que envolvem cálculos probabilísticos, como os métodos Bayesianos, demandam a existência de dados numéricos prévios, o que representa uma barreira para aplicações onde tais informações não estão disponíveis ou sua obtenção tem uma relação custo-benefício desfavorável.

A probabilidade subjetiva lida com eventos que não são reproduzíveis e não têm uma base histórica da qual possa ser extrapolado um valor numérico de probabilidade. A probabilidade subjetiva é, na verdade, uma crença ou opinião expressa por um ou mais especialistas. Essas crenças e opiniões têm um papel importante no desenvolvimento de sistemas especialistas [7].

2.4.2. Múltiplos Valores de Verdade

As limitações da lógica de dois valores (verdadeiro e falso) são conhecidas desde a época de Aristóteles. Ele reconheceu que proposições sobre eventos futuros não seriam verdadeiras nem falsas até que realmente ocorressem.

Dentre as várias teorias lógicas baseadas em múltiplos valores de verdade formuladas, pode-se destacar a lógica de três valores de Kleene. Além dos dois valores de verdade da teoria lógica clássica, VERDADEIRO e FALSO, Kleene atribuiu um terceiro: DESCONHECIDO, o qual reflete a incerteza relacionada a uma proposição, não permitindo declará-la nem verdadeira nem falsa [10].

Os três valores de verdade sugerem dois tipos de ordenamentos naturais, considerando “quantidade de conhecimento” e “grau de verdade”. Se não se sabe o valor de verdade (clássico) de uma sentença então é possível que o aumento do conhecimento leve à conclusão de que a sentença é verdadeira ou falsa. Assim, na ordem de conhecimento, o valor de verdade de DESCONHECIDO está abaixo de VERDADEIRO e FALSO. Quando o aspecto do grau de verdade é considerado, não ter

certeza se uma sentença é falsa é melhor do que sabê-la falsa, enquanto saber que é verdadeira é ainda melhor. Então, na ordem de grau de verdade, o valor DESCONHECIDO é um valor intermediário. Estes conceitos estão representados na figura 03.

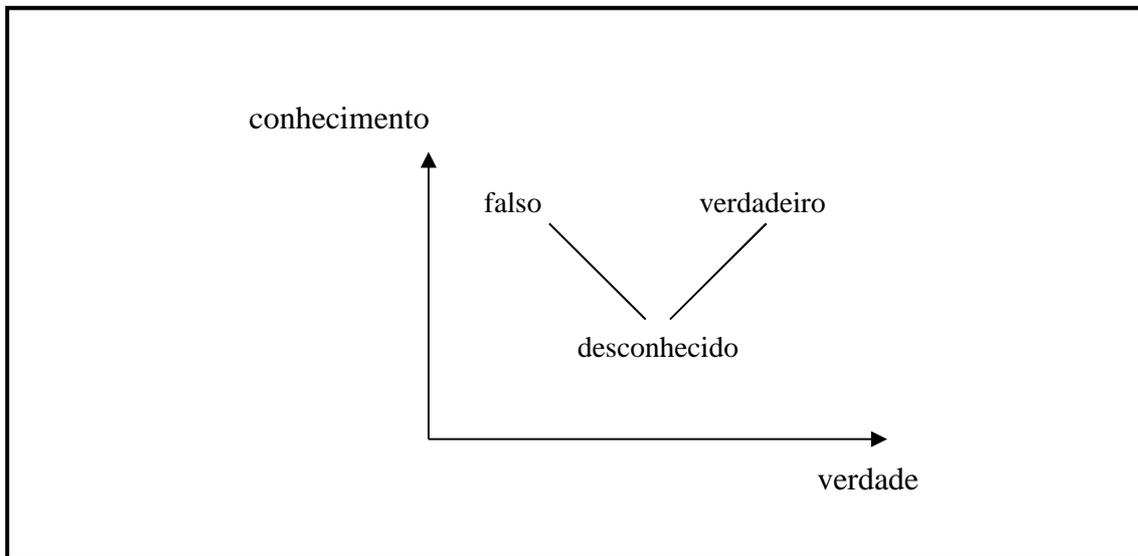


Figura 3 – Lógica de Três Valores de Kleene

Na lógica de três valores de Kleene, os operadores lógicos de negação (\neg), conjunção (\wedge), disjunção (\vee) e condicional (\rightarrow) geram as tabelas verdade representadas na figura 4, onde V (verdadeiro), I (incerto) e F (falso):

considerada uma linguagem multiparadigma, permitindo a combinação de paradigmas de programação procedural, funcional e orientada a objetos.

Algumas características da linguagem Lisp se destacam:

- *Sintaxe simples.* A forma canônica de Lisp é a mesma tanto para programas quanto para dados – ambos são listas de itens fechadas por parênteses. Esta dualidade programa-dados tem conseqüências significativas que destacam Lisp das outras linguagens [11].

- *Capacidade de expansão.* Lisp pode expandir. Uma conseqüência da propriedade programa-dados é que o programador pode facilmente expandir a linguagem. Ela pode ser acrescida de novas funções, ou alterações sintáticas podem ser feitas através de macros. A dificuldade em expandir a linguagem não é maior do que programar nela. De fato, é tão fácil e útil expandir a linguagem que esta se torna uma prática usual [12].

- *Argumentos funcionais.* Lisp permite que funções sejam usadas como argumentos para outras funções e que sejam retornadas como valores. Esta característica pode ser vista como um mecanismo de alto nível para utilização de programas como dados.

- *Programação funcional.* As funções retornam valores e os programas em Lisp podem ser um fluxo contínuo de funções chamando outras funções sem ocorrência de efeitos colaterais [11].

- *Linguagem interativa.* Common Lisp possui características exploratórias, pois permite o desenvolvimento do código de forma incremental e interativa. Seu ambiente permite que partes do código sejam avaliadas e testadas de forma imediata, sem necessidade de compilação. Assim, se o programador não sabe exatamente como o programa irá se comportar, ele pode desenvolvê-lo por etapas, por exemplo, escrevendo, testando, alterando e retestando funções, antes de inseri-las no programa [13].

Com a evolução para Common Lisp, novas características foram incorporadas, como:

- *Depuração e verificação de erros.* Common Lisp fornece uma variedade de funções de depuração que pode também ser incorporadas ao próprio código.

- *Programação Orientada a Objetos*. Common Lisp Object System (CLOS) foi incluído no Common Lisp, incorporando todas as vantagens da metodologia orientada a objetos.

A linguagem de programação Lisp permanece sendo utilizada no desenvolvimento de novos projetos em diversas áreas. No campo da inteligência artificial, a linguagem é utilizada em áreas como entendimento da linguagem natural, jogos, aprendizado, planejamento, prova de teoremas, solução de problemas e reconhecimento de voz.

Lisp foi a linguagem escolhida para desenvolver o sistema especialista baseado em regras MYCIN, programa bem-sucedido utilizado para suportar diagnósticos de doenças causadas por infecções bacteriológicas [14]. As principais razões para a escolha foram sua inerente capacidade de manipulação simbólica, seu ambiente de programação favorável à execução de testes e modificações rápidas e a facilidade com que a linguagem permite o desenvolvimento independente da base de regras e dos procedimentos de inferência.

Desta forma, considerando os aspectos da linguagem citados, sua extensa variedade de aplicações e exemplos de programas disponíveis para consulta e estudo, a linguagem Common Lisp foi escolhida para desenvolver este trabalho.

CAPÍTULO 3

IDENTIFICAÇÃO DE ACIDENTES E OPERAÇÕES ANORMAIS

Neste capítulo, o método de identificação de acidentes e operações anormais da usina nuclear de Angra 2 será apresentado. Serão também apresentados alguns dos acidentes que constam nos procedimentos de diagnóstico utilizados pelas equipes de operação. Por último, serão discutidas as técnicas de inteligência artificial aplicadas, até o presente momento, ao problema de identificação de acidentes e operações anormais.

3.1. Introdução

O processo de diagnóstico de acidentes e operações anormais da usina nuclear de Angra 2 está estabelecido sobre três princípios básicos: aderência a procedimentos escritos para diagnóstico, equipes de operação com sólido conhecimento técnico das operações anormais e acidentes postulados e, disponibilidade de informações adequadas e confiáveis para os operadores da sala de controle.

O Manual de Operação da Usina de Angra 2, Partes 2 e 3, contém os procedimentos para diagnóstico de todas as operações anormais e acidentes postulados. O procedimento “Identificação de Acidentes” auxilia as equipes de operação no diagnóstico inicial do evento a partir de uma variação não programada de potência do reator ou do desarme do reator. Este procedimento contém as chamadas árvores lógicas de diagnóstico que conduzem os operadores na avaliação da condição da planta, no diagnóstico de qual evento está ocorrendo e, por fim, determinam qual o procedimento específico a ser utilizado para o evento.

Para cada evento postulado, desde transientes de menor severidade, como transientes de sobrerresfriamento, até os acidentes base de projeto da usina, existe um procedimento específico. Estes são chamados de procedimentos orientados para o evento e contém fluxogramas e instruções detalhadas passo a passo para o acidente ou operação anormal em questão [15].

Caso não seja possível a identificação do acidente ou operação anormal através das árvores lógicas de diagnóstico, a planta é mantida em condição segura através dos procedimentos orientados para a função de segurança. As funções de segurança, ou funções críticas de segurança, é um conjunto de seis parâmetros vitais que, se forem mantidos dentro dos limites definidos, garantem a integridade do encamisamento dos elementos combustíveis e do sistema de refrigeração do reator, mantendo o núcleo em condição segura.

O conhecimento técnico para diagnóstico de acidentes é adquirido pelos operadores durante o processo de formação. Os operadores de sala de controle, antes de receberem a licença da Comissão de Energia Nuclear (CNEN) para operarem os controles da usina, passam por extenso treinamento de formação, que inclui o estudo teórico de todas as operações anormais e acidentes e treinamento prático em cenários de simulador. As equipes licenciadas para trabalharem na sala de controle, devem cumprir um plano de treinamento contínuo, que inclui a prática periódica em simulador de todos os cenários postulados.

O projeto do *layout* da sala de controle preconiza a disposição estratégica dos indicadores das variáveis mais importantes para o diagnóstico de acidentes e operações anormais. Parâmetros importantes para diagnóstico também estão disponíveis em telas de computador junto aos operadores, possibilitando monitoração do valor atual e curvas de tendência. As Funções Críticas de Segurança são monitoradas em tempo real por computador e a alteração da condição de quaisquer delas é imediatamente indicada em monitores dedicados.

A instrumentação, que recebe, trata e disponibiliza os dados de parâmetros de segurança da planta, possui elevado grau de confiabilidade, tendo seu projeto premissas como redundância, diversidade, monitoração de falhas passivas e características técnicas adequadas às condições ambientais dos acidentes em que devam estar disponíveis.

Quando os parâmetros da usina saem das faixas operacionais normais são gerados alarmes visuais e sonoros para as equipes de operação. Dois sistemas de alarmes na sala de controle se complementam para fornecer informações necessárias

para o diagnóstico do que está ocorrendo: o Sistema de anunciadores visuais dos painéis e o Sistema de alarmes de computador de processo. Os anunciadores visuais são distribuídos nos painéis da sala de controle e estão hierarquizados em níveis de prioridade, caracterizados por cores e sons de atuação diferenciados. O computador de processo disponibiliza alarmes com informações mais específicas em dois níveis de prioridade.

Embora o treinamento contínuo, a utilização dos procedimentos de diagnóstico e o projeto da instrumentação e da sala de controle sejam fatores determinantes para a segurança na identificação dos mau-funcionamentos, o processo de diagnóstico pode impor desafios às equipes de operação.

Em alguns cenários de acidentes treinados em simulador, é gerada uma grande quantidade e variedade de informações em um curto espaço de tempo. A equipe de operação precisa avaliar as variações dos parâmetros da planta, indicados na sala de controle do simulador, e analisar os alarmes presentes nos painéis e nos monitores do computador de processo. Em certas circunstâncias, é necessário avaliar a evolução temporal de parâmetros ao longo do acidente simulado, utilizando-se os registradores gráficos disponíveis na sala de controle. Neste contexto, o cenário simulado impõe que a equipe trabalhe de forma coordenada e atenta, utilizando os procedimentos de diagnóstico, para a correta priorização e interpretação dos dados apresentados.

Durante os treinamentos em simulador, a dificuldade para o diagnóstico aumenta conforme se impõe maior complexidade aos cenários, por exemplo, quando são gerados cenários que combinam a ocorrência de dois eventos simultâneos ou quando um evento ocorre conjugado com falhas de atuação de componentes ou sistemas. Estes cenários, embora improváveis de ocorrerem, são gerados para desafiar a capacidade de diagnóstico das equipes de operação em treinamento.

3.2. Identificação de Acidentes e Operações Anormais na Usina Nuclear de Angra

2

Como descrito na seção anterior, o acidente pode ser gerenciado através de orientação para o evento ou para a função de segurança. O gerenciamento orientado

para evento considera um tratamento específico para o evento, com base em um diagnóstico inequívoco do acidente causador do evento. O gerenciamento orientado para função de segurança é utilizado quando não for possível diagnosticar o acidente ou quando for realizado um diagnóstico incorreto ou quando uma função de segurança estiver em risco ou tiver sido violada.

A combinação dos dois tipos de gerenciamento de acidentes garante a segurança do núcleo. Mesmo na impossibilidade de um diagnóstico correto do evento, a planta é estabilizada em uma condição segura através da aplicação das ações definidas nos procedimentos orientados para função de segurança. Nesta seção, será abordado o gerenciamento orientado para evento.

Dentro do conceito de gerenciamento orientado para evento, uma identificação inequívoca de acidente baseada em sintomas é realizada quando todos os outros possíveis eventos com os mesmos sintomas forem descartados. Até que a identificação tenha sido concluída, todos os possíveis acidentes devem ser considerados como causas potenciais [16].

O manual de operação da usina nuclear de Angra 2 aborda dois conjuntos de eventos para diagnóstico: as operações anormais que não resultam em um desarme automático do reator e os eventos que levam ao desarme automático. Cada conjunto possui uma árvore lógica de diagnóstico na forma de um fluxograma que guia as equipes de operação para a identificação do evento e seu manual específico.

O Guia de Operação de Emergência direciona inicialmente o gerenciamento do evento que tenha levado a um desarme automático do reator. Nestes casos, a planta é inicialmente transferida para uma condição segura através das ações automáticas. O projeto da planta é tal que as ações manuais não são necessárias em um período de até 30 minutos. Isto fornece ao pessoal de operação tempo para efetuar o diagnóstico do evento, considerar as ações a serem tomadas e executar as preparações necessárias. Permite-se, contudo, que as ações manuais sejam iniciadas a qualquer tempo, mesmo dentro dos 30 minutos do início do evento [16].

A primeira tarefa dos operadores para o diagnóstico é a verificação do desarme do reator e o cumprimento das funções críticas de segurança, através da avaliação de um conjunto conciso de parâmetros e indicações na sala de controle. Se, nesta fase, identifica-se que uma ou mais barras de controle falharam em cair, são iniciadas ações manuais imediatas para inserção da barra falhada ou compensação de sua reatividade através de injeção manual de ácido bórico. Se um dos parâmetros das Funções Críticas de Segurança (FCS) estiver fora dos limites, as contramedidas relativas a esta FCS devem ser tomadas até que os parâmetros retornem para os valores normais. Estando o desarme do reator confirmado e as funções críticas de segurança asseguradas, a equipe de operação inicia o diagnóstico através da árvore lógica de diagnóstico (ALD) para eventos com desarme automático do reator. Uma representação parcial da ALD é apresentada na Figura 5.

Utilizando a ALD, a equipe de operação identifica o evento e o capítulo do manual de operação correspondente. Este procedimento específico contém um diagrama de diagnóstico, também na forma de fluxograma, e uma lista com as tendências esperadas dos principais parâmetros, os quais são utilizados para confirmar o diagnóstico realizado previamente através da ALD. Em alguns acidentes, no diagrama de diagnóstico correspondente, a identificação do evento se aprofunda, definindo variantes do acidente em análise. Por exemplo, uma vez diagnosticado que o evento em andamento é um acidente com ruptura do sistema de refrigeração do reator com atuação do sistema de proteção do reator, evento reconhecido como LOCA (Loss of Coolant Accident), o seu diagrama lógico específico guia os operadores para a identificação de uma das quatro variantes possíveis que são: LOCA grande, médio, pequeno e LOCA no espaço vapor do pressurizador ou não fechamento de uma válvula deste.

Portanto, nos eventos onde o desarme do reator é iniciado, o processo de diagnóstico se inicia na verificação do efetivo desarme do reator e termina na confirmação do diagnóstico e identificação de possíveis variantes do acidente, já no procedimento orientado ao evento. Na sequência, os operadores utilizam o procedimento para confirmar a atuação correta das ações automáticas e para executar as ações manuais necessárias, garantindo a segurança da planta.

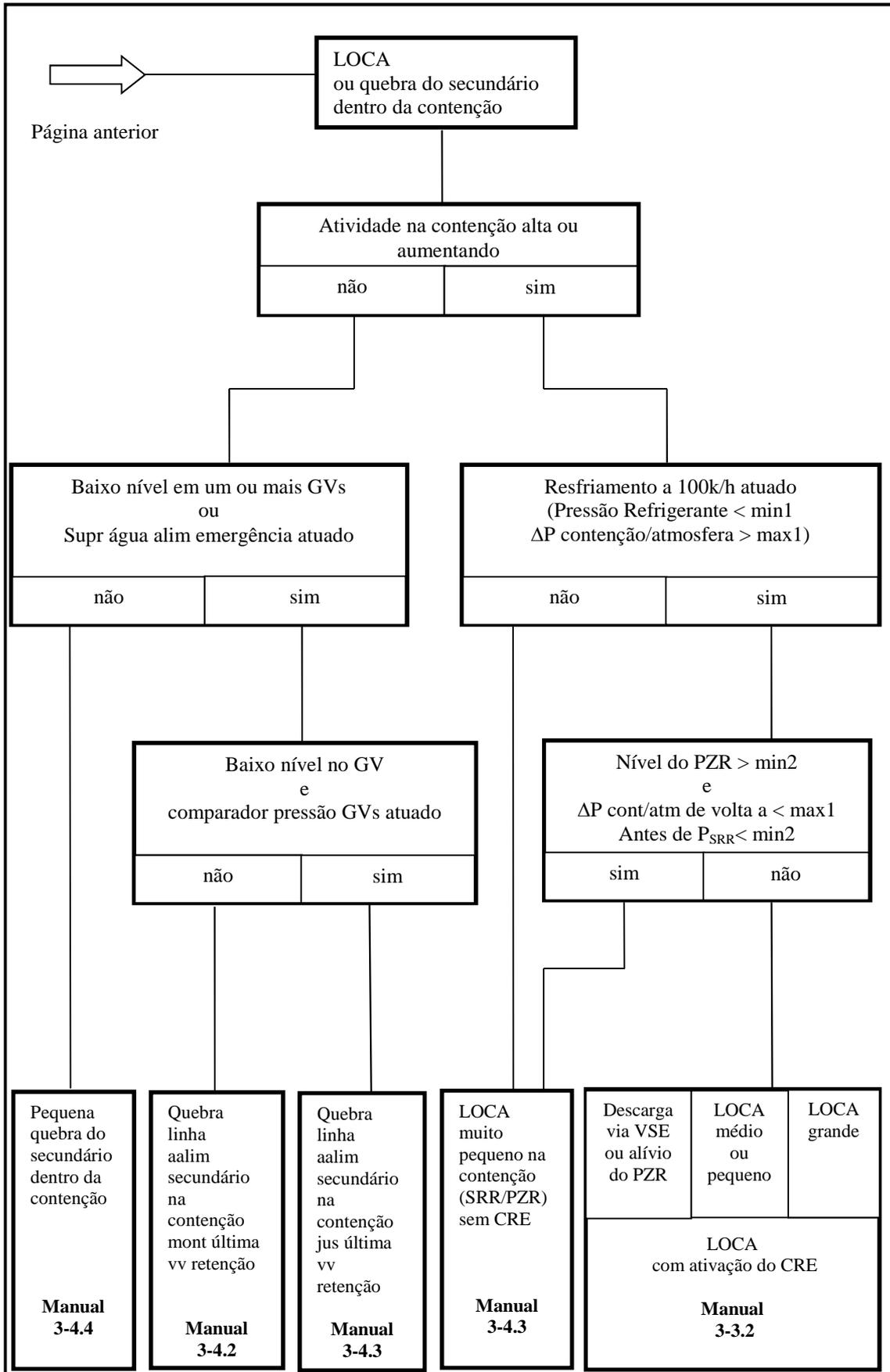


Figura 5 – Representação parcial da Árvore Lógica de Diagnóstico

Para os eventos menos severos, nos quais não é iniciado o desarme do reator, o diagnóstico é análogo, utilizando-se a ALD relativa a estes eventos, sem necessidade de verificação do efetivo desarme do reator, tampouco das funções de segurança.

3.3. Acidentes Postulados

A usina é projetada para que, em todos os eventos postulados de ocorrer, os seguintes objetivos de segurança sejam atendidos: desligamento seguro e subcriticalidade a longo termo, remoção de calor residual, limitação das liberações radioativas [17].

No caso de transientes operacionais, é demonstrado que os sistemas atuados pelos sistemas de controle operacionais e pelo sistema de limitação são suficientes para:

- Manter a integridade das barreiras contra produtos de fissão (sem fusão no centro das pastilhas de combustível, operação contínua irrestrita dos elementos combustíveis, integridade do sistema de refrigeração do reator);
- Manter o carregamento dos componentes dentro dos limites operacionais;
- Evitar a liberação radioativa para o meio ambiente além dos limites permitidos para operação normal.

Para acidentes, é demonstrado que os sistemas de segurança atuados pelo sistema de proteção do reator são efetivos o suficiente para:

- Manter a integridade adequada das barreiras contra produtos de fissão (fusão parcial no centro das pastilhas de combustível possível, perda limitada da integridade do encamisamento das varetas de combustível e integridade da contenção);
- Manter o carregamento dos componentes dentro dos limites aceitáveis para a condição de acidente;
- Evitar a liberação radioativa para o meio-ambiente além dos limites permitidos para condições de acidente.

Existem trinta e oito eventos definidos no manual de operação da usina de Angra 2, classificados entre operações anormais e acidentes. Nesta seção será apresentada uma breve descrição de alguns destes acidentes postulados. Os eventos que serviram como escopo deste trabalho foram:

- Perda de refrigerante na contenção (LOCA);
- Rupturas de tubos de gerador de vapor (RTGV);
- Quebra de linha de água de alimentação dentro da contenção;
- Quebra de linha de vapor principal a jusante da válvula de isolamento de vapor principal;
- Transiente de sobrerresfriamento causado por falhas no secundário;
- Pequena quebra do secundário dentro da contenção.

Considerando a perspectiva da tarefa de diagnóstico de acidentes, será descrito com maior ênfase o comportamento inicial da planta nos eventos, sem maiores considerações em relação às ações manuais tomadas pelas equipes de operação.

Os acidentes com perda de refrigerante dentro da contenção caracterizam-se pela ocorrência de uma ruptura no sistema de refrigeração do reator ou por uma falha em válvula do sistema, ocorrendo perda de inventário de refrigerante e depressurização do Sistema de Refrigeração do Reator (SRR). Estes acidentes são analisados em função do tamanho da ruptura e sua localização no SRR. São categorizados no manual de operação da usina como: LOCA grande, médio, pequeno, no espaço vapor do pressurizador (PZR) ou falha de válvula do PZR, e LOCA muito pequeno sem ativação dos critérios de refrigeração de emergência do núcleo.

Após a ocorrência de uma ruptura no circuito primário, o reator é desligado automaticamente pelo sistema de proteção do reator. Entretanto, o núcleo continua gerando calor de decaimento. Este calor residual pode alcançar até 8,5% da potência nominal logo após o desligamento [18]. O mais importante objetivo de segurança é refrigerar o núcleo e, para isso, o inventário e a transferência de calor do SRR devem ser mantidos todo o tempo.

No caso de um LOCA grande, a ruptura causa uma perda muito rápida de refrigerante e uma queda acentuada da pressão do SRR. A perda de inventário pode levar ao descobrimento do núcleo por alguns segundos. Ao longo do evento, o calor residual é removido em grande parte pelo fluxo mássico de refrigerante através da própria ruptura.

O sistema de proteção do reator inicia uma série de ações automáticas para fazer frente ao evento, destacando-se:

- Desarme automático do reator;
- Isolamento do SRR;
- Isolamento da contenção, minimizando a liberação de radioatividade para o meio-ambiente;
- Resfriamento automático através dos geradores de vapor. No caso de grande LOCA, este resfriamento tem pouco efeito, uma vez que o calor é removido pela própria ruptura.
- Partida das bombas de injeção de segurança e bombas de remoção de calor residual, injetando água borada para a reinundação e refrigeração do núcleo. Parte do inventário de refrigerante injetado é perdida pela ruptura e contido no fundo da contenção;
- Injeção passiva de todo o inventário dos acumuladores no núcleo;

Cerca de vinte minutos após o início do evento, todo o inventário dos tanques de água borada é injetado e as bombas de remoção de calor residual são comutadas automaticamente para succionar o inventário acumulado no fundo da contenção, mantendo o núcleo refrigerado e coberto com água borada [19]. Rupturas com seção reta equivalente a 0,25A a 2A das tubulações do sistema de refrigeração do reator, modeladas matematicamente, têm o comportamento descrito acima e são classificadas como grande LOCA.

No LOCA médio, as mesmas ações automáticas são iniciadas, mas depressurização é mais lenta, a pressão se reduz abaixo de 9 bar, quando as bombas de remoção de calor residual compensam as perdas pela ruptura, mantendo a pressão do SRR. O calor do primário é removido em parte pelo secundário, através dos geradores de vapor, em parte pela própria ruptura. Ao fim das ações automáticas, as bombas de remoção de calor residual estarão no modo de recirculação perna quente-perna fria ou estarão succionando do fundo da contenção, o núcleo estará coberto e refrigerado e o secundário estará fazendo a redução da temperatura do primário a uma taxa constante. As rupturas de seção reta de 50 cm² a 0,25A são consideradas como LOCA médio.

O vazamento de refrigerante em um LOCA pequeno é repostado em uma faixa de pressão acima de 9 bar através da vazão das bombas de injeção de alta pressão. O primário é mantido sub-resfriado e o secundário tem papel fundamental na remoção de calor do primário. As demais ações automáticas são semelhantes às ocorridas em rupturas maiores. As rupturas entre 3 cm² e 50 cm² são classificadas como LOCA pequeno.

Para rupturas no espaço vapor do PZR ou o não fechamento de uma válvula de segurança ou alívio do mesmo, o comportamento da planta é semelhante ao de um LOCA pequeno, exceto pelo nível do pressurizador, que cai brevemente e depois sobe até o final da escala indicada, quando a pressão cai à pressão de saturação. Outra diferença é uma elevação mais rápida da pressão na contenção em casos de ruptura no espaço vapor.

Outro evento considerado no projeto da planta é a ruptura de tubo de gerador de vapor, conhecido como RTGV. Quando ocorre um vazamento através de tubo em U de um gerador de vapor (GV) há uma transferência de refrigerante radioativo para o circuito secundário, devido à pressão mais alta do circuito primário. O projeto da usina supõe o caso mais desfavorável, ou seja, a ruptura completa de um tubo em U de um GV, o que levaria a uma taxa de vazamento de aproximadamente 40 kg/s [20].

O procedimento de identificação de acidentes da usina de Angra 2 divide os eventos com ruptura de tubo de gerador de vapor em três abordagens principais: RTGV com violação dos limites de atividade de vapor principal (VP), RTGV sem violação dos limites de atividade de VP com ativação dos critérios de refrigeração de emergência do núcleo (CREN) e RTGV sem violação dos limites de atividade de VP e sem ativação do CREN.

Uma ruptura de tubo de GV leva a um aumento da atividade do vapor que sai do gerador de vapor afetado. Existem seis monitores de atividade na saída de vapor de cada GV, três tubos contadores Geiger-Müller e três cintiladores de iodeto de sódio, para detecção de atividade do N16 e de gases nobres. Quando um dos limites é atingido o sistema de proteção do reator reconhece o RTGV e ativa, através do sistema de limitação, uma série de ações automáticas com dois objetivos principais: limitar a perda

de refrigerante do primário para o secundário e evitar a abertura de válvulas de alívio de vapor para a atmosfera. O sistema de limitação reduz rapidamente a potência do reator e do gerador elétrico e despressuriza o primário para diminuir a diferença de pressão entre o primário e o secundário, reduzindo a taxa de vazamento. O reator é desarmado pelo sistema de proteção do reator. Após as ações automáticas, as equipes de operação iniciam as ações manuais para isolar o GV afetado. O manual de operação trata variantes para o RTGV com violação de limites de atividade do VP, considerando a ocorrência simultânea de perda de suprimento elétrico externo ou a ativação dos critérios de refrigeração de emergência do núcleo.

Postula-se também a ocorrência de RTGV, com taxas altas de vazamento, mas sem violação dos limites de atividade de VP. Assume-se que a atividade do refrigerante está muito baixa e que se está operando em potência reduzida. Neste cenário bastante específico, as altas taxas de vazamento causam a redução do nível do PZR e despressurização acentuada do primário. O reator é desarmado e os critérios de refrigeração de emergência do núcleo são ativados. A equipe de operação, após o diagnóstico do evento, inicia ações de resfriamento da planta e isolamento do GV afetado.

Existem eventos onde a ruptura de tubo do GV é muito pequena para violar os limites de atividade no vapor do secundário. Nestes casos, os controles do primário compensam a queda de nível do PZR e da pressão do SRR. No secundário os monitores de atividade são sensibilizados, mas não o suficiente para ativar as ações automáticas. A usina é desligada e resfriada pela equipe de operação conforme determinação das Especificações Técnicas.

Acidentes de quebra de linha de água de alimentação do secundário dentro da contenção levam a uma mudança abrupta das condições ambientais da contenção, com aumento da umidade, temperatura e condensação. O aumento da pressão da contenção leva ao desarme do reator e da turbina. O sistema de ventilação da contenção é isolado. No secundário ocorre a perda rápida de pressão de vapor principal, a qual é reconhecida pelo sistema de proteção do reator que inicia o isolamento das linhas de VP e de água de alimentação principal e o desligamento das bombas de água de alimentação principal.

O procedimento de identificação de acidentes da usina de Angra 2 divide os eventos de quebra de linha de água de alimentação em quebra a jusante e a montante da válvula de retenção do GV afetado. Cada um dos geradores de vapor possui uma válvula de retenção, localizada próximo ao GV, dentro da contenção, na linha de água de alimentação. Uma quebra a jusante da mesma leva à perda do inventário do lado secundário do GV afetado para dentro da contenção e à atuação de sinais de proteção do reator isolando totalmente o GV. A quebra a montante da válvula de retenção não drena o GV afetado. Em ambos os casos, ao final das ações automáticas, a planta estará na condição subcrítico quente.

O acidente de quebra de linha de vapor principal do secundário a jusante da válvula de isolamento de vapor principal é assumido ocorrer a 100% de potência no início do evento. A queda de pressão de VP é muito rápida e o sistema de proteção do reator inicia o desarme do reator e turbina e o isolamento do secundário pelo critério de alta taxa de queda de pressão de vapor principal. As bombas de água de alimentação principal são desligadas e os geradores de vapor são alimentados pelas bombas de partida e parada. A pressão de VP sobe nos quatro geradores de vapor e as válvulas de alívio de VP abrem resfriando a planta e reduzindo a pressão de VP nos quatro geradores de vapor. Ao final das ações automáticas a usina estará na condição subcrítico quente.

Transientes de sobrerresfriamento podem ser ocasionados por pequena quebra de linha de vapor principal, abertura indevida de válvula de vapor, vazamento ou válvula de alívio de vapor parcialmente aberta. O transiente é reconhecido pela diminuição da pressão de vapor principal, temperatura do refrigerante e de nível do PZR. Dependendo da intensidade do transiente, pode ocorrer elevação da potência do reator para 103% da potência nominal, devido à inserção temporária de reatividade positiva pela redução de temperatura do primário. Neste caso, o sistema de limitação atua, reduzindo a potência do reator. Para transientes mais acentuados, o nível do PZR cai abaixo do mínimo, devido à contração do refrigerante, ocorrendo o desarme do reator e turbina, isolamento do primário e desligamento das bombas de refrigeração do reator. As variáveis da contenção permanecem sem alteração. Não ocorre aumento dos níveis de atividade radioativa.

As pequenas rupturas do lado secundário dentro da contenção levam à alteração das condições ambientais da contenção, como umidade e temperatura. A pressão da contenção pode subir e, em alguns casos, atingir o limite que leva ao desarme do reator. O nível do pressurizador e a pressão do primário permanecem dentro da banda de controle e não ocorre resfriamento do primário considerável. Não ocorre, tampouco, aumento de atividade da contenção. Ao final das ações automáticas, se não ocorreu o desarme do reator por critério da alta pressão na contenção, a usina permanece em operação à potência.

3.4. Técnicas de Inteligência Artificial Aplicadas ao Diagnóstico de Acidentes

Conforme já mencionado, operações anormais e acidentes podem se apresentar como cenários complexos, onde uma grande quantidade de informações é disponibilizada para as equipes de operação. O problema de diagnóstico em espaços de busca complexos tem sido extensivamente explorado, em diversas áreas de aplicação, por soluções que utilizam técnicas de inteligência artificial.

Desde o início da década de 80, organizações ligadas à indústria nuclear, centros de pesquisa e universidades têm desenvolvido pesquisas de sistemas avançados de suporte aos operadores, na tentativa de utilizar o potencial das diferentes técnicas de inteligência artificial para fornecer informações de alto nível em tempo real para os operadores das usinas. Neste contexto, diversos trabalhos foram desenvolvidos com base em sistemas especialistas, redes neurais artificiais, lógicas nebulosas, algoritmos genéticos e inteligência de enxames para resolver o problema de diagnóstico e monitoração em usinas nucleares [21].

Em 1980, a EG&G Idaho Inc. iniciou o desenvolvimento do sistema especialista REACTOR com o propósito de monitorar uma usina nuclear, detectar desvios de condições normais, determinar a significância da situação, e recomendar uma resposta apropriada. Ele operava em uma extensa base de conhecimento, utilizando metodologias de busca com encadeamento para frente (*forward*) e para trás (*backward*). A busca era realizada para frente a partir de fatos conhecidos até que uma conclusão fosse alcançada. Se não houvesse informação suficiente para uma conclusão, o sistema iniciava uma busca para trás para determinar a informação necessária, obtida da

instrumentação da planta ou dos operadores. Sua base de conhecimento era dividida em conhecimento orientado para função e orientado para evento. O conhecimento para função continha dados sobre a configuração dos sistemas e do comportamento integrado dos componentes para dada função. A base de conhecimento para evento descrevia o comportamento esperado da planta em condições de acidente, com base em dados de matemáticos e simulações computacionais [22].

GUO e UHRIG [23] utilizaram redes neurais artificiais para monitorar cenários de acidentes em um simulador de treinamento. Uma rede de Kohonen auto-organizável era utilizada para pré-processar os dados originais para reduzir o número total de padrões de treinamento. Os cenários de acidentes eram monitorados por um conjunto de redes neurais de tamanho menor, chamadas de redes modulares, cada uma monitorando apenas um cenário de acidente, obtendo assim um treinamento da rede mais rápido.

A combinação de mais de uma técnica de inteligência artificial levou ao surgimento dos chamados sistemas híbridos. Para identificação de eventos anormais que causam desarme do reator, OHGA e SEKI [24] propuseram uma estrutura de dois níveis composta de uma rede neural seguida de um sistema especialista. Em um primeiro nível, a rede neural recebe os dados analógicos e define os possíveis componentes falhados. No segundo nível, o sistema especialista, com uma base de conhecimento heurísticamente desenvolvida, recebe o diagnóstico da rede e confirma os resultados, utilizando dados digitais da condição da planta. Testes em programas de análise de transientes mostraram bons resultados mesmos quando os dados analógicos apresentaram ruído ou quando as condições dos cenários eram diferentes daquelas nas quais a rede neural fora treinada, por exemplo, em diferentes níveis de queima do combustível.

BARTAL, *et al.* [25] propuseram a utilização de redes neurais probabilísticas para classificar um transiente desconhecido como “não sei” se o mesmo não estivesse contido dentro de sua base de conhecimento acumulada. A capacidade do classificador foi comprovada em testes em um simulador da usina de três loops de San Onofre unidade 1. Neste trabalho foi aplicada a técnica de acúmulo de evidência, na qual o histórico das classificações dos instantes anteriores é utilizado para melhorar a precisão e consistência da classificação.

Em 1995, o sistema de auxílio on-line ao operador (OASYS) foi desenvolvido para suportar o processo de decisão de operadores. OASYS consistia de quatro subsistemas: validação e gerenciamento de sinais, monitoração da planta, diagnóstico e filtragem de alarmes e seguimento dinâmico de procedimentos de emergência. O sistema utilizava a combinação de técnica de sistema especialista baseado em regras e lógica nebulosa. O sistema especialista foi utilizado para classificar eventos pré-definidos e executar o seguimento de procedimentos de emergência através do processamento de dados da planta. A lógica nebulosa foi utilizada para gerar alarmes conceituais de alto nível para diagnósticos antecipados e para modelar os critérios qualitativos nebulosos presentes nos procedimentos de emergência [26].

PEREIRA *et al.* [27] descreveram uma metodologia que utiliza um algoritmo genético como um algoritmo de otimização de um sistema de classificação baseado em medidas de distâncias euclidianas. O método, chamado de “Conjunto Mínimo de Centróides”, utiliza o algoritmo genético para dividir o espaço de busca do problema e encontrar subconjunto de classes, cujos centróides representam o máximo número de classificações corretas.

ALMEIDA [28] aperfeiçoou o trabalho anterior com a utilização de uma abordagem possibilística. Este tipo de abordagem substituiu a medida direta de distâncias euclidianas, permitindo regras de classificação mais consistentes. Uma heurística para definição de zonas de influência dos centróides das partições foi estabelecida, possibilitando a obtenção da resposta “não sei” para os transientes desconhecidos.

MOL *et al.* [29] desenvolveram um modelo neural para identificação dinâmica de transientes com capacidade de resposta “não sei” para os eventos não pertencentes ao conjunto de aprendizado da rede. A abordagem utiliza duas redes de camadas múltiplas, treinadas com algoritmo de propagação reversa. A primeira rede é responsável pela identificação dinâmica. A mesma utiliza como entrada um pequeno conjunto (em uma janela de tempo móvel) de medições recentes de cada variável, evitando a necessidade de se utilizar os eventos iniciadores. A outra rede neural efetua a validação da

identificação instantânea da primeira rede através da validação de cada variável. Esta rede permite também a resposta “não sei” para eventos desconhecidos.

O algoritmo de otimização por inteligência de enxames, conhecido por PSO (“Particle Swarm Optimization”) foi utilizado por MEDEIROS e SCHIRRU [4] para otimizar o método de classificação de transientes por discriminação de distâncias euclidianas. Neste método, para cada transiente postulado é utilizada uma assinatura de um grupo de variáveis. Quando uma operação anormal ocorre, o sistema compara a evolução das variáveis da planta com essas assinaturas. O transiente postulado que tiver a assinatura mais similar ao evento em curso será o evento identificado. Esta similaridade é dada pela distância, a cada instante t , entre as variáveis do transiente e o centróide do transiente postulado. O algoritmo PSO foi aplicado para encontrar os centróides dos transientes postulados que maximizavam o número de classificações corretas.

NICOLAU [21] avaliou o comportamento dos algoritmos de inspiração quântica, QEA (*Quantum Inspired Evolutionary Algorithm*) e QSE (*Quantum Swarm Evolutionary*) em espaços de busca contínuos e discretos de alta dimensão. Além disso, apresentou um método de identificação de acidentes otimizado pelo algoritmo QEA. O método classificava o evento dentro da assinatura de três acidentes postulados de uma usina nuclear. O QEA foi utilizado para encontrar a melhor posição dos centróides protótipos dos três acidentes postulados, com um número máximo de acertos.

MO *et. al.* [30] desenvolveram um modelo DNNA (*dynamic neural network aggregation*) para detecção e classificação de transientes em uma usina nuclear. O modelo proposto utiliza uma arquitetura classificadora de dois níveis com um modelo DNNA ao invés de uma rede neural convencional. O tipo do transiente é diagnosticado no primeiro nível, através de uma rede neural que utiliza sinais binários dos alarmes gerados pelos eventos. O segundo nível de classificação é composto de um estágio de predição da severidade e de um segundo estágio para determinar a localização da falha. Cada um destes estágios é composto de uma rede neural e uma função agregação soma. O sistema demonstrou ser capaz de fornecer uma avaliação numérica da severidade dos eventos mais apurada do que de outros modelos.

CAPÍTULO 4

PROTÓTIPO DE SISTEMA ESPECIALISTA PARA IDENTIFICAÇÃO DE ACIDENTES

Neste capítulo, inicialmente, será descrito o escopo escolhido dos acidentes para teste do protótipo do sistema especialista. Em seguida, será apresentado o protótipo em si, com uma descrição de seus componentes. Por fim, a implementação do sistema será abordada, com uma breve discussão das principais funções desenvolvidas na linguagem Lisp.

4.1. Introdução

Conforme descrito no capítulo anterior, o diagnóstico não se limita a identificar qual acidente está ocorrendo, mas diagnosticar de forma inequívoca o acidente, qual manual orientado ao evento utilizar e qual variante do acidente em questão está ocorrendo. Em alguns acidentes, é importante também estimar valores quantitativos relacionados ao evento, bem como o componente afetado. Por exemplo, em um acidente com ruptura de tubo de gerador de vapor, é necessário inferir a taxa inicial de vazamento através da ruptura, bem como identificar o gerador de vapor falhado.

O protótipo do Sistema Especialista (SE) proposto foi modelado para emular o processo de diagnóstico de acidentes utilizado pelas equipes de operação. A base de conhecimento do SE proposto é composta de regras criadas a partir do conhecimento utilizado pelos operadores para efetuar o diagnóstico. Essas regras absorvem a heurística especialista de diagnóstico. As fases de diagnóstico realizadas pelo SE proposto são semelhantes àsquelas presentes nas árvores lógicas de diagnóstico e fluxogramas utilizados pelos operadores.

O objetivo do modelo é efetuar a identificação do acidente em estágios progressivos de diagnóstico, onde o primeiro nível define se a usina está em operação normal ou anormal/acidente, o segundo nível classifica em qual grupo de acidentes o evento se enquadra, o terceiro nível especifica o acidente e o manual de operação orientado para o evento e o quarto nível define a variante do acidente. Quando o sistema proposto identifica que a planta está operando fora de suas condições operacionais

normais, mas não consegue enquadrá-la em um dos grupos de acidentes, o mesmo emite uma resposta do tipo “não sei”.

Foi escolhido um conjunto de acidentes, pertencentes aos acidentes do manual de operação da usina de Angra 2, para ser o escopo de trabalho do sistema proposto. São três os grupos de acidentes escolhidos: LOCA ou quebra do secundário dentro da contenção, RTGV e, quebra de linha de vapor principal fora da contenção. Os acidentes pertencentes a estes grupos foram previamente descritos no capítulo anterior.

Para a execução do diagnóstico, o protótipo lê os parâmetros da planta em intervalos fixos de tempo, chamados de ciclos de diagnóstico. Os valores adquiridos da planta são avaliados pelo sistema proposto através das regras da base de conhecimento, gerando conclusões que levam ao diagnóstico do evento. O sistema proposto efetua um diagnóstico completo a cada ciclo de 10 segundos, durante um período de 5 minutos. Essa sequência temporal de diagnóstico é armazenada em arquivo texto.

4.2. Escopo dos Acidentes Selecionados

Os acidentes escolhidos e suas variantes estão representados na Figura 6, através de um grafo de estados. A tabela 1 lista os acidentes com os correspondentes manuais orientados ao evento. Com já mencionado, o modelo propõe a identificação dos eventos em níveis de diagnóstico progressivos.

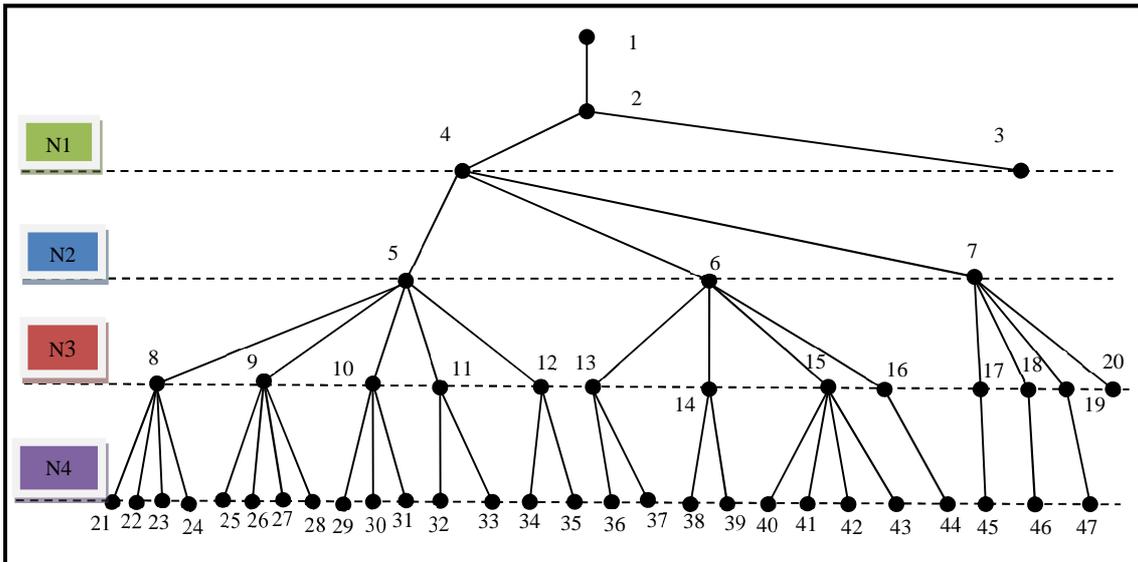


Figura 6 – Grafo Representativo dos Diagnósticos Possíveis

Tabela 1 – Acidentes Escolhidos e suas Variantes

Identificação no Grafo	Descrição do Acidente
1	Operação Normal
2	Transiente
3	Evento Não Identificado (resposta do tipo “ não sei”)
4	Operação Anormal
5	LOCA ou Quebra do secundário na Contenção
6	RTGV com/sem Limites de Atividade Excedidos
7	Quebra de Linha de VP fora da Contenção
8	LOCA muito Pequeno na Contenção (SRR/PZR) sem CREN – Manual 3-3.1
9	LOCA com CREN – Manual 3-3.2
10	Pequena Quebra do Secundário dentro da Contenção – Manual 3-4.4
11	Quebra de In alim Secundário na Contenção a Montante Última VRT - Manual 3-4.2
12	Quebra de In alim Secundário na Contenção a Jusante Última VRT – Manual 3-4.3
13	RTGV sem Violação dos Limites de Atividade de VP sem CREN - Manual 2-4.15
14	RTGV sem Violação dos Limites de Atividade VP e com CREN - Manual 3-3.4
15	RTGV com Violação dos Limites de Atividade de VP - Manual 3-3.5
16	Iniciação Espúria dos Limites de Atividade de VP - Manual 2-4.12.3
17	Iniciação Espúria do Sinal de var. de Pressão de VP (DAF1) - Manual 2-4.12.2
18	Transiente de Sobrefriamento Causado por Falhas no Secundário - Manual 3-4.7
19	Quebra de In de VP a jusante de Válvula de Isolamento de VP - Manual 3-4.5
20	Válvula de Segurança ou Controle de Alívio da VP Bloqueada Aberta Após Atuação Manual 3-4.6
21	Fuga Muito Pequena SRR/PZR, $DP_{CONT/ATM} > 30$ mbar, RESA, sem CREN Manual 3-3.1 – CASO A
22	Fuga muito Pequena no PZR, $DP_{CONT/ATM} < 30$ mbar, RESA, sem CREN Manual 3-3.1 – CASO B
23	Fuga muito Pequena no SRR, $DP_{CONT/ATM} < 30$ mbar, Operação Pot.
24	Suspeita Vazamento muito Pequeno lado Primário ou Secundário Manual 5 – JMY
25	LOCA Grande - Manual 3-3.2 - CASO A
26	LOCA Médio - Manual 3-3.2 - CASO B
27	LOCA Pequeno - Manual 3-3.2 - CASO C
28	LOCA Pequeno no Espaço Vapor do PZR ou não Fechamento de VV. Manual 3-3.2 - CASO D

<i>Identificação no Grafo</i>	<i>Descrição do Acidente</i>
29	Ruptura Pequena Lado Secundário na Contenção, RESA, sem CREN
30	Suspeita de Vazamento no lado Secundário com $DP_{CONT/ATM} < 30$ mbar, sem RESA
31	Suspeita de Vazamento muito Pequeno no lado Primário ou lado Secundário Manual 5 – JMY
32	Quebra de In de Água de Alimentação na Contenção a Montante da VRT sem CREN Manual 3-4.2 – Caminho A
33	Quebra de In de Água de Alimentação na Contenção a Montante da VRT com CREN Manual 3-4.2 – Caminho B
34	RTGV sem Violação dos Limites de Atividade de VP, PZR dentro da banda morta Manual 2-4.15 – Caminho A
35	RTGV sem Violação dos Limites de Atividade de VP, PZR abaixo da banda morta Manual 2-4.15 – Caminho B
36	RTGV sem Violação dos Limites de Atividade de VP, com CREN, sem AEE Manual 3-3.4 – Caminho A
37	RTGV sem Violação dos Limites de Atividade de VP, com CREN, com AEE Manual 3-3.4 – Caminho B
38	RTGV com Violação dos Limites de Atividade de VP, sem CREN, sem AEE Manual 3-3.5 – Caminho A
39	RTGV com Violação dos Limites de Atividade de VP, sem CREN, com AEE Manual 3-3.5 – Caminho B
40	RTGV com Violação dos Limites de Atividade de VP, com CREN, sem AEE Manual 3-3.5 – Caminho C
41	RTGV com Violação dos Limites de Atividade de VP, com CREN, com AEE Manual 3-3.5 – Caminho D
42	Iniciação Espúria dos Limites de Atividade de VP (confirmação)
43	Iniciação Espúria do Sinal DAF1 (confirmação)
44	Transiente de Sobrerresfriamento Causado por Falhas Lado Secundário (confirmação)
45	Quebra In de VP a Jusante da Válvula de Isolamento de VP (confirmação)

O nível 1 da Figura 6 (N1) identifica que a usina saiu das condições normais de operação. Se o modelo reconhecer que o transiente está dentro do conjunto de acidentes que o mesmo é capaz de diagnosticar, então é identificada uma condição de Operação

Anormal. Se o modelo não conseguir identificar o transiente como sendo do seu escopo de diagnóstico, o mesmo declara Evento Não Identificado.

O nível 2 da Figura 6 (N2) reconhece que o evento se enquadra em um dos três grupos de acidentes:

- 1) LOCA dentro da Contenção/Quebra do Secundário na Contenção.
- 2) RTGV.
- 3) Quebra de linha de Vapor Principal fora da Contenção.

O nível 3 da Figura 6 (N3) faz o diagnóstico de qual acidente está ocorrendo e qual Manual de Operação deve ser utilizado. São 13 possíveis acidentes, variando do acidente 8 ao 20 da figura 6 e tabela 1.

O nível 4 da Figura 6 (N4) identifica qual a variante do acidente em evolução. As variantes estão identificadas na Figura 6 e Tabela 1 do nó 21 ao nó 47, somando 27 variantes no total.

4.3. Protótipo de Sistema Especialista Proposto

O Sistema Especialista (SE) proposto possui 3 principais componentes: base de conhecimento, motor de inferência e base de fatos, os quais serão descritos a seguir.

4.3.1. Base de Fatos

Os fatos retratam a condição da planta em um dado instante. A base de fatos foi dividida em dois conjuntos:

- Fatos de Processo;
- Fatos de Contexto.

Os Fatos de Processo são os valores dos parâmetros, adquiridos da planta por um processo de monitoração em tempo real. Para o modelo, foram utilizadas 64 variáveis, analógicas e digitais, medidas e calculadas. Foram escolhidas as variáveis que as equipes de operação necessitam para efetuar o diagnóstico dos eventos do escopo do

trabalho. A Tabela 2 apresenta o conjunto dessas variáveis com uma breve descrição de cada uma delas.

Tabela 2 – Variáveis de Processo Utilizadas pelo Modelo

<i>CÓDIGO</i>	<i>DESCRIÇÃO</i>	<i>CÓDIGO</i>	<i>DESCRIÇÃO</i>
PSRR	PRESSAO ATUAL REFRIG.	JRQ75_AT	SINAL DESL *LAR*
PG	POT. ATIVA GERADOR	JRM67_AT	SINAL FECH VBL VSE
NPZR	NÍVEL PRESSURIZADOR	JRN67_AT	SINAL FECH VBL VSE
CREN_AT	CRIT. REFR. EMERG. ATIVO	JRP67_AT	SINAL FECH VBL VSE
100K_AT	SINAL RESFR 100 K/H	JRQ67_AT	SINAL FECH VBL VSE
PKG	2° MAX POT. REATOR	DPU	DP *UJB*/ATM
DAF2_AT	QUEDA P GV2 <MIN2	ATV_VP_GV1	ATIVIDADE LN VP1-TIPO A
JR 66	SINAL FECHAMENTO DE VBL DE ALÍVIO VP	ATV_VP_GV2	ATIVIDADE LN VP2-TIPO A
KBA_INJ	FLUXO LN ALIMEN. TCV	ATV_VP_GP3	ATIVIDADE LN VP3-TIPO A
DP	DP SL GRANDES EQUIP/ATM	ATV_VP_GV4	ATIVIDADE LN VP4-TIPO A
JRM74_AT	SIN PART AALIM EMERG	JR63_AT	SINAL ISOL BCARGA
JRN74_AT	SINAL PARTIDA *LAR*	CLSRTGV1	CLASSE S RTGV-1
JRP74_AT	SINAL PARTIDA *LAR*	JYK01_CR	DOSE CAM ACS PESS 1
JRQ74_AT	SINAL PARTIDA *LAR*	NLAA	L TQ AGUA ALIMEN.
BBA	SINAL PARTIDA DIES 1	VRNPZR	VREF EF NIVEL PZR
BBB	SINAL PARTIDA DIES 1	KBA_EXT_11	F JUS EST. RED. AP 11
BBC	SINAL PARTIDA DIES 1	KBA_EXT_12	F JUS EST. RED. AP 12
RESA	DESLIG. REATOR	PVP	P MAX. DE VP
NGV10	2° MAX NÍVEL GV1	LBA10CF	FLUXO VAPOR JUS GV 1
NGV20	2° MAX NÍVEL GV2	LBA20CF	FLUXO VAPOR JUS GV 2
NGV30	2° MAX NÍVEL GV3	LBA30CF	FLUXO VAPOR JUS GV 3
NGV40	2° MAX NÍVEL GV4	LBA40CF	FLUXO VAPOR JUS GV 4
JRN52_AT	SINAL RESFR VIA LIM	TMED	2°MAX TEMP. MED.
KLK45	ATV BETA EVAC. COND.	LAB60CG	POS. VV. PL CARGA GV1
LAB10CF	FLUXO ÁGUA MONT GV1	LAB70CG	POS. VV. PL CARGA GV2
LAB20CF	FLUXO ÁGUA MONT GV2	LAB80CG	POS. VV. PL CARGA GV3
LAB30CF	FLUXO ÁGUA MONT GV3	LAB90CG	POS. VV. PL CARGA GV4
LAB40CF	FLUXO ÁGUA MONT GV4	LAB64CG	POS. VV. BX CARGA GV1
JRM75_AT	SIN DESL AALIM EMERG	LAB74CG	POS. VV. BX CARGA GV2
JRN75_AT	SINAL DESL *LAR*	LAB84CG	POS. VV. BX CARGA GV3
JRP75_AT	SINAL DESL *LAR*	LAB94CG	POS. VV. BX CARGA GV4
KLK10CR	ATIVIDADE VENT STACK	KLK70CR	ATV AEROSÓIS SL GRAND EQUIPAMENTOS

Para avaliação do sistema proposto, foram utilizados os dados obtidos dos cenários do simulador de Angra 2. Para cada evento analisado, um arquivo foi gerado,

contendo o comportamento temporal de todas as variáveis de processo escolhidas. O sistema proposto transfere os valores das variáveis do arquivo para uma estrutura de dados interna, e lê os valores de forma temporizada, simulando uma monitoração em tempo real da planta.

Os Fatos de Contexto são aqueles gerados pelo motor de inferência do sistema, a partir da base de conhecimento. Quando os antecedentes de uma regra são satisfeitos, o conseqüente se torna um novo fato a ser inserido na base de fatos. Esses Fatos de Contexto caracterizam as conclusões parciais alcançadas pelo sistema proposto, conforme são realizadas as inferências sobre os fatos existentes, utilizando as regras de diagnóstico implementadas.

A figura 7 exemplifica a geração de um fato de contexto novo. No exemplo, a regra 22 é interpretada pelo sistema da seguinte forma:

- Se a diferença de pressão entre contenção e atmosfera (DP) for menor do que 30mbar no ciclo atual ($< DP\ 0\ 30$) e (AND) a diferença de pressão (DP) aumentou do ciclo anterior para o atual de 2 mbar ($> DP\ 0\ (+\ DP\ 1\ 2.0)$) então,
- Declarar como incerto o fato: DP acima de 30 mbar (DP30MBAR 0 1 0).

Uma vez que os antecedentes da regra 22 são satisfeitos, o novo fato (DP30MBAR 0 1 0) é inserido na base de fatos.

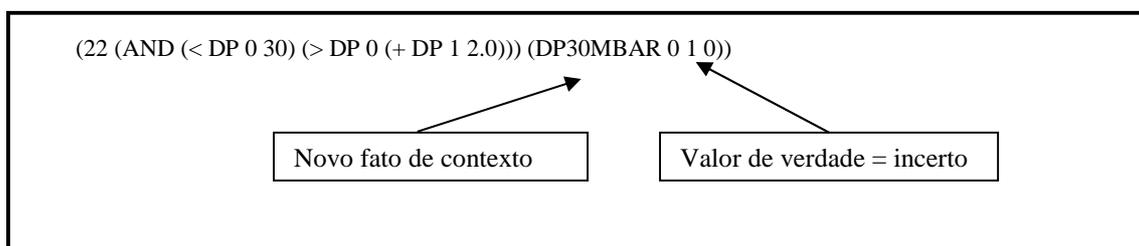


Figura 7 – Exemplo de geração de novo fato de contexto

O formato dos Fatos de Contexto é dado por uma lista, contendo uma “string” de identificação e três dígitos que definem o valor de verdade do fato entre verdadeiro, incerto e falso. No exemplo, o fato declara como incerto que a diferença de pressão

entre contenção e atmosfera tenha atingido 30 mbar (DP30MBAR). O tratamento da incerteza será discutido adiante.

4.3.2. Base de Conhecimento

A base de conhecimento contém as regras que representam o conhecimento especialista. As regras foram desenvolvidas tendo como referência os procedimentos de acidentes e operações anormais existentes e a experiência de operação adquirida durante os treinamentos em simulador.

A base atual do sistema proposto contém um total de 95 regras de diagnóstico para cobrir o conjunto de acidentes escolhido para o trabalho. Conforme já mencionado anteriormente, a base de regras é o núcleo do sistema, podendo ser ampliada ou alterada de forma simples, sem que seja necessário alterar o motor de inferência. As regras do modelo estão dispostas em um arquivo texto e cada regra é representada em formato de lista, o formato básico da linguagem Lisp.

As regras são declarações do tipo “Se (antecedentes), Então (consequentes)”. Quando a parte condicional de uma regra é satisfeita, a consequência é assumida ser verdadeira. A figura 8 mostra uma regra da base de conhecimento.

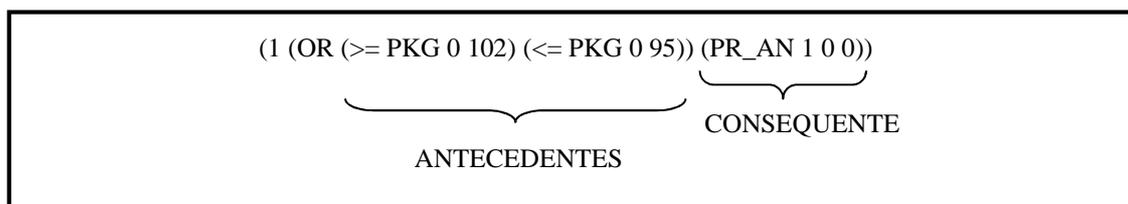


Figura 8: Exemplo de regra da base de conhecimento

Cada regra é identificada pelo primeiro número à esquerda da lista, neste caso, regra 1. No exemplo, a regra contém dois antecedentes agrupados através do conector lógico OR. Se a potência térmica do reator (PKG) estiver acima de 102% P_N no ciclo de diagnóstico atual, ou PKG estiver abaixo de 95% P_N no ciclo atual, a parte condicional é satisfeita e o consequente torna-se verdadeiro. Neste caso, o consequente declara um novo fato, potência do reator anormal - verdadeiro (PR_AN 1 0 0).

Nos antecedentes das regras, o ciclo de diagnóstico em que o valor da variável deve ser considerado é representado por um inteiro, onde 0 representa o ciclo atual, 1 representa o ciclo de 10 segundos anterior e assim por diante. Desta forma, no antecedente (\geq PKG 0 102), o inteiro 0 representa o ciclo atual.

Os antecedentes presentes na parte condicional podem ser agrupados através dos conectores lógicos AND, OR e NOT e o sistema proposto interpreta logicamente qualquer combinação destes fatos. Cada antecedente pode conter Fatos de Processo e Fatos de Contexto.

Os Fatos de Processo, inseridos nos antecedentes das regras, são comparados com valores limite através de comparadores $>$, $<$, \geq e \leq . Comparações também podem ser realizadas entre valores da mesma variável, ocorridos em instantes diferentes no tempo. Os antecedentes podem conter operações de soma e subtração sobre variáveis de processo. Além dos operadores OR, AND, NOT, $>$, $<$, \geq , \leq , $+$ e $-$, foram desenvolvidos os operadores específicos: TAXA, QQ, MIN1, MAX1 e ANTES.

O operador TAXA é utilizado na regra quando se quer determinar se, em qualquer instante anterior a partir do início do evento, a variável de processo variou com taxa maior do que um determinado valor (em unidades/min). Por exemplo, quando o sistema avalia uma regra contendo o antecedente (TAXA PVP -3.5), ele buscará algum instante t em que a pressão de vapor principal variou a -3.5 bar/min ou mais. Caso encontre, o antecedente será considerado verdadeiro.

QQ é utilizado quando se deseja saber se uma variável de processo atingiu um determinado valor em um instante anterior qualquer. Por exemplo, o antecedente (\geq PVP QQ 85) será satisfeito se, em algum instante anterior, a pressão de vapor principal ultrapassou o valor de 85 bar.

MIN1 é aplicado em uma regra para determinar se existe um valor medido claramente abaixo dos valores medidos de outras redundâncias. Assim, o antecedente (MIN1 LAB10CF LAB20CF LAB30CF LAB40CF) será satisfeito se, no instante t , o fluxo de água de alimentação de um dos geradores de vapor estiver claramente menor do que os demais.

De forma similar a MIN1, o operador MAX1 é aplicado em uma regra para determinar se um valor está claramente acima dos demais valores medidos de outras redundâncias. Assim, o antecedente (MAX1 NGV10 NGV20 NGV30 NGV40) será satisfeito se, no instante t , um dos geradores de vapor estiver com nível mais alto que os demais.

ANTES verifica se um determinado sinal binário ocorreu no tempo antes de um segundo sinal binário. O antecedente (ANTES RESA SPR_GRAD_VP) será satisfeito se o sinal de desarme do reator (RESA) ocorreu em algum momento anterior à atuação do sinal da proteção do reator que é acionado em grandes gradientes de pressão de vapor principal.

Como já descrito anteriormente, o sistema proposto emula as regras e o raciocínio utilizados pelos operadores durante o diagnóstico. Em algumas situações, esse raciocínio é caracterizado pela incerteza. Por exemplo, para efetuar qualquer diagnóstico, uma das perguntas que a equipe de operação deve responder, de acordo com a árvore lógica de diagnóstico (ALD), é se a diferença de pressão entre a contenção e a atmosfera está aumentando ou não. Se estiver, isso é um indicativo de que alguma falha está ocorrendo dentro da contenção. Caso contrário, a ALD irá guiar para falhas externas à contenção. A ALD não define qual taxa deve ser considerada como limite, ou acima de qual valor de pressão na contenção pode-se considerar que a diferença “aumentou”. Os operadores, para responder à pergunta, observam a tendência da variável, comparam com o valor esperado em condições normais, descartam possíveis oscilações presentes e dão a resposta. Em cenários de simulador, essa heurística é utilizada com sucesso no diagnóstico dos eventos.

Outra situação onde o raciocínio incerto se faz presente ocorre quando um parâmetro está com uma taxa de elevação e a equipe de operação deve avaliar se o mesmo está acima de um dado valor limite ou não. Como exemplo, considere-se o cenário onde a equipe de operação deva avaliar se a diferença de pressão entre a contenção e a atmosfera ($\Delta P_{\text{CONT/ATM}}$) atingiu o valor de 30 mbar. No instante da avaliação, o $\Delta P_{\text{CONT/ATM}}$ está abaixo desse valor, entretanto a pressão na contenção está claramente subindo e é provável, porém, não certo, de que o valor de 30 mbar será

atingido. Nesse instante, simplesmente declarar como falsa afirmação de que o $\Delta P_{\text{CONT/ATM}}$ atingiu 30 mbar pode obrigar a uma revisão do diagnóstico logo adiante. A forma de raciocínio vai depender de quão clara é a tendência de que se atinja o limite. Os operadores podem manter a monitoração do parâmetro por mais alguns instantes e certificar de que o limite foi atingido, ou continuar o diagnóstico, assumindo que o valor não foi atingido e que o diagnóstico poderá ser revisado posteriormente. Em situações de simulador, os dois caminhos de raciocínio seguidos levam, de uma forma ou de outra, ao diagnóstico correto.

Estas heurísticas de raciocínio incerto foram introduzidas em algumas regras da base de conhecimento do sistema proposto. As conclusões de regras que puderem assumir um caráter incerto foram modeladas através de três valores de verdade: verdadeiro, incerto ou falso. Desta forma, o conseqüente de uma regra pode conter um fato de contexto incerto quando, nos antecedentes das regras, os valores de parâmetros não garantem uma conclusão de valor verdadeiro ou falso, seja porque o valor está dentro de uma faixa duvidosa naquele instante, ou porque existe uma clara tendência de variação do parâmetro. A figura 9 ilustra esse raciocínio.

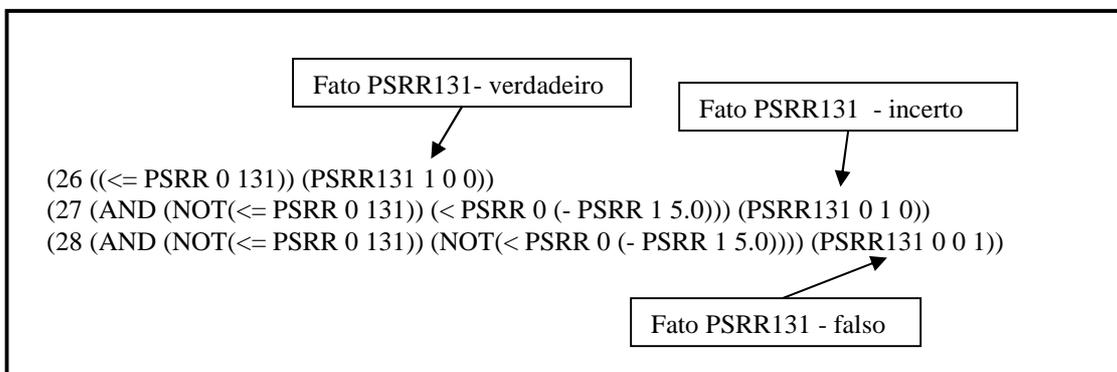


Figura 9 – Exemplo de raciocínio com três valores de verdade

O exemplo apresenta 3 regras onde:

- Regra 26: se o valor da pressão do SRR estiver abaixo de 131 bar no ciclo atual, então é gerado um novo fato de contexto indicando que ocorreu uma grande depressurização do primário e que o valor limite de 131 bar foi atingido naquele instante: (PSRR131 1 0 0). No antecedente (\leq PSRR 0 131), o inteiro 0 representa o ciclo atual de diagnóstico.

- Regra 27: se a pressão estiver acima de 131 bar no ciclo atual, mas apresenta um gradiente negativo claro, então o fato incerto (PSRR131 0 1 0) é gerado para aquele instante. Nesta regra, o antecedente ($< \text{PSRR } 0 \text{ (- PSRR } 1 \text{ } 5.0)$) representa o gradiente negativo e será satisfeito quando a pressão do SRR no ciclo atual (indicado por 0) for menor do que a pressão no ciclo anterior (indicado por 1) em 5 bar.

- Regra 28: se a pressão estiver acima de 131 bar, sem um gradiente de queda claro, então o fato (PSRR131 0 0 1) indicará falso para a afirmação de que a pressão atingiu o valor limite.

A base de conhecimento foi desenvolvida com a premissa básica de que a incerteza, quando houver, será mantida no consequente da regra e nenhum fato incerto pode estar contido em um antecedente. Assim, a parte condicional das regras contém os fatos de contexto com valor verdadeiro ou falso. Os fatos contextuais incertos gerados pelas inferências são incorporados à base de fatos e apresentados a cada ciclo de diagnóstico, permitindo o acompanhamento das inferências realizadas. O efeito dessa abordagem é de evitar que encadeamento de inferências seja realizado a partir de fatos considerados incertos. Ou seja, uma conclusão que depender de um fato com valor de verdade incerto será evitada, até que o fato, ao longo do tempo, assumo um valor verdadeiro ou falso. A figura 10 ilustra o tema.

```
(26 ((<= PSRR 0 131)) (PSRR131 1 0 0))
(27 (AND (NOT(<= PSRR 0 131)) (< PSRR 0 (- PSRR 1 5.0))) (PSRR131 0 1 0))
(28 (AND (NOT(<= PSRR 0 131)) (NOT(< PSRR 0 (- PSRR 1 5.0)))) (PSRR131 0 0 1))

(67 (AND (...) (...) (...) (PSRR131 1 0 0) (...)) (FUGA_MPQ_PZR_RESA 1 0 0))
(68 (AND (...) (...) (...) (...) (PSRR131 0 0 1) (...)) (FUGA_MPQ_SRR_POT 1 0 0))
```

Figura 10 – Exemplo de Encadeamento de Inferência

Neste exemplo, a conclusão da regra 67, fuga muito pequena no pressurizador com RESA (FUGA_MPQ_PZR_RESA 1 0 0), só será atingida se todos os antecedentes forem satisfeitos, entre eles (PSRR131 1 0 0), ou seja, é necessário que o fato PSRR131 seja verdadeiro. Por outro lado, a conclusão da regra 68, fuga muito pequena no SRR

sem RESA (FUGA_MPQ _SRR_POT 1 0 0) somente será alcançada se o antecedente (PSRR131 0 0 1) for satisfeito, ou seja, se o fato PSRR131 tiver valor falso. Portanto, enquanto o valor de verdade do fato PSRR131 for incerto, as inferências sobre as regras 67 e 68 não alcançarão nem uma conclusão nem outra, o que caracteriza que as indicações da planta, naquele instante específico, não permitem um diagnóstico certo. O sistema, assim, emula o raciocínio humano na incerteza.

A figura 11 apresenta as quinze primeiras regras da base de conhecimento. As regras 1 a 9 definem quando parâmetros importantes se encontram em valores anormais para uma condição de 100% de potência da usina. Desta forma, a regra 5 define:

- Se o nível do gerador de vapor 10 (NGV10) estiver maior ou igual a 12,6 metros no ciclo atual (\geq NGV10 0 12.6) ou (OR) estiver menor ou igual a 11,5 metros no ciclo atual (\leq NGV10 0 11.5) então,
- Declarar que o nível do gerador de vapor 10 está anormal (NGV10_AN 1 0 0), com valor de verdade igual a verdadeiro.

As regras 10, 11 e 12 definem se diferença de pressão entre contenção e atmosfera está aumentando, com os valores de verdade verdadeiro (GRAD_DP 1 0 0), incerto (GRAD_DP 0 1 0) e falso (GRAD_DP 0 0 1), respectivamente.

As regras 13, 14 e 15 definem se a atividade do lado secundário está alta, com os valores de verdade verdadeiro (ATV_SEC_ALTA 1 0 0), incerto (ATV_SEC_ALTA 0 1 0) e falso (ATV_SEC_ALTA 0 0 1), respectivamente.

```

(1 (OR (>= PKG 0 102) (<= PKG 0 95)) (PR_AN 1 0 0))
(2 (OR (>= PG 0 1370) (<= PG 0 1330)) (PG_AN 1 0 0))
(3 (OR (>= PSRR 0 164) (<= PSRR 0 150)) (PSRR_AN 1 0 0))
(4 (OR (>= NPZR 0 8.8) (<= NPZR 0 7)) (NPZR_AN 1 0 0))
(5 (OR (>= NGV10 0 12.6) (<= NGV10 0 11.5)) (NGV10_AN 1 0 0))
(6 (OR (>= NGV20 0 12.6) (<= NGV20 0 11.5)) (NGV20_AN 1 0 0))
(7 (OR (>= NGV30 0 12.6) (<= NGV30 0 11.5)) (NGV30_AN 1 0 0))
(8 (OR (>= NGV40 0 12.6) (<= NGV40 0 11.5)) (NGV40_AN 1 0 0))
(9 (OR (>= PVP 0 78) (<= PVP 0 59)) (PVP_AN 1 0 0))
(10 (OR (>= DP 0 (+ DP 3 0.3)) (>= DP 0 0.0)) (GRAD_DP 1 0 0))
(11 (AND (>= DP 0 (+ DP 1 0.1)) (< DP 0 0.0) (NOT(>= DP 0 (+ DP 3 0.3)))) (GRAD_DP 0 1 0))
(12 (AND (NOT (>= DP 0 (+ DP 1 0.1))) (< DP 0 0.0)) (GRAD_DP 0 0 1))
(13 ((>= RAD_SEC_A 0 8)) (ATV_SEC_ALTA 1 0 0))
(14 (AND(>= RAD_SEC_A 0 (+ RAD_SEC_A 3 1.0)) (< RAD_SEC_A 0 8)) (ATV_SEC_ALTA 0 1 0))
(15 (AND(NOT (>= RAD_SEC_A 0 (+ RAD_SEC_A 3 1.0))) (< RAD_SEC_A 0 8)) (ATV_SEC_ALTA 0 0 1))
...
...

```

Figura 11 – Base de Conhecimento Parcial

4.3.3. Motor de Inferência

O motor de inferência é o componente do sistema especialista que determina quais regras são satisfeitas pelos fatos existentes. No sistema proposto, o motor de inferência utiliza o método de encadeamento para frente (*forward chaining*). Este tipo de abordagem começa com os fatos inicialmente conhecidos e avalia quais regras são satisfeitas pelos fatos, tirando novas conclusões. Essas conclusões são novos fatos de contexto que ampliam a base de fatos. Conforme novos fatos são gerados, novas regras podem ser satisfeitas e processo continua em direção à solução do problema, no caso, em direção ao diagnóstico do evento. Esse processo repetitivo, descrito no capítulo 2, contém três fases: casamento, resolução de conflito e execução. A Figura 12 ilustra o motor de inferência.

No casamento, todas as regras, cujos antecedentes forem satisfeitos pelos fatos, são selecionadas e formam o conjunto de conflito. Na resolução de conflito, uma das regras é escolhida para ser queimada e gerar um novo fato de contexto. No modelo, a resolução de conflito é realizada selecionando a regra de menor índice, dentre as regras do conjunto de conflito. A razão para que a resolução seja feita dessa forma está no fato de que as regras estão ordenadas na base de conhecimento em uma sequência próxima àquela dos fluxogramas de diagnóstico utilizados pelos operadores. Assim, as regras de menor índice representam as avaliações que, normalmente, precedem as de maior índice.

A execução consiste na queima da regra selecionada, onde o conseqüente é inserido na base de fatos. Uma regra específica só pode ser executada uma única vez em cada ciclo de diagnóstico. Após a geração do novo fato, todo o processo de casamento, resolução de conflito e execução se repete, até que não existam regras a serem queimadas no ciclo de diagnóstico, quando então a inferência termina e o diagnóstico alcançado no ciclo é gravado em arquivo.

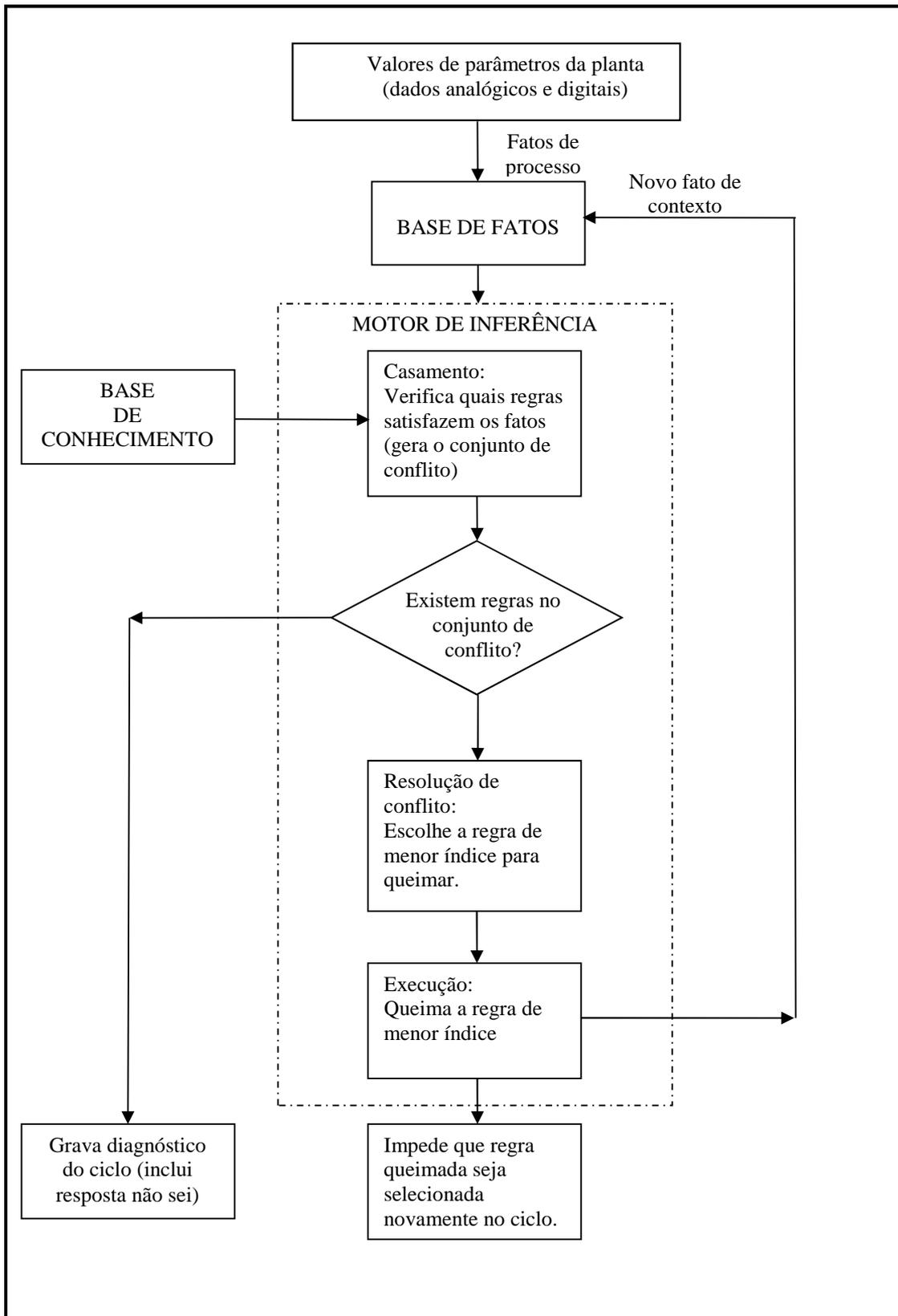


Figura 12 – Motor de Inferência do Protótipo

4.4. Implementação do Modelo de Sistema Especialista Proposto

O modelo de sistema proposto utiliza a notória capacidade de reconhecimento simbólico da linguagem Lisp para manipular, comparar e avaliar regras e fatos, inseridos em estruturas de dados, como listas e tabelas. O paradigma da programação funcional direcionou a implementação do modelo, onde funções foram extensamente utilizadas, seja para manipular a grande quantidade de dados das bases de conhecimento e de fatos, seja para desenvolver o motor de inferência.

Nesta seção serão abordados os aspectos centrais da implementação em Lisp do modelo de sistema proposto. Serão enumeradas as principais funções desenvolvidas, com uma breve descrição de suas respectivas ações.

A estrutura de dados utilizada pelo sistema proposto para armazenar tanto os fatos como as regras é a *hash table* [12], tabela especializada em associar pares de objetos, uma chave e um valor, onde ambos podem ser objetos de qualquer tipo, como lista, variável ou outra *hash table*. As principais *hash table* utilizadas foram:

- **fatos** - armazena os fatos de processo, lidos a cada 10 segundos de arquivo texto que contém os parâmetros da planta.
- **regras** - armazena todas as regras de diagnóstico.
- **regras-m** - armazena as regras de monitoração.
- **seleção** - armazena as regras selecionadas para o conjunto de conflito.
- **r-queimadas** - armazena as regras já executadas pelo motor de inferência.
- **fatos-novos** - armazena os fatos de contexto gerados pelo motor de inferência.

O sistema proposto atua em duas fases distintas: monitoração e diagnóstico. Na monitoração o sistema avalia os parâmetros da planta a cada 10 segundos e verifica se a planta está ou não operando em condição normal. Nessa fase, o sistema utiliza um conjunto de regras reduzido, suficiente apenas para determinar se a planta saiu de sua condição normal de operação. Quando, durante a fase de monitoração, é identificado que um ou mais parâmetros da planta estão fora da faixa operacional, o sistema declara

que está ocorrendo uma operação anormal ou um transiente, iniciando fase de diagnóstico. Nesta, o sistema continua avaliando os parâmetros da planta a cada 10 segundos, mas utiliza a base de conhecimento completa, com todas as regras definidas, buscando o diagnóstico do evento. A busca do modelo foi previamente definida para durar 5 minutos, intervalo de tempo considerado suficiente para o diagnóstico do evento e que, ao mesmo tempo, atenderia à demanda de informação adequada para suporte à equipe de operação durante a dinâmica de um evento.

O sistema proposto inicia o processo de monitoração/diagnóstico através da função ANGRA2, que inicializa a *hash table* *fatos* com valores padrão de operação a $100\%P_N$, e dispara a monitoração temporizada, chamando a função MONITORA. Esta função avalia se a planta opera em condição normal, anormal ou transiente. Para tanto, utiliza a função auxiliar LER-FATOS para adquirir os dados da planta, acessa as regras de *regras-m* e aciona o motor de inferência, implementado pela função INFERÊNCIA. Se for identificada uma operação anormal ou transiente, a função IDENT é chamada para efetuar a identificação do evento nos quatro níveis de diagnóstico. IDENT utiliza a base de conhecimento da *hash table* *regras* e também aciona o motor de inferência. Através de uma função auxiliar, IDENT grava em arquivo, a cada ciclo de diagnóstico, os fatos de contexto armazenados em *fatos-novos*. IDENT está limitada a ser executada por 5 minutos, ao fim dos quais o processo de diagnóstico termina.

A função INFERENCIA atua como o motor de inferência, e utiliza duas funções para tanto: SELEC-REGRAS e RES-CONFLITO. A primeira verifica quais regras satisfazem os fatos, inserindo-as em *seleção*. SELEC-REGRAS faz uso das funções auxiliares AVALIA-C, AVALIA-P e BOOLE-LST. AVALIA-C e AVALIA-P são chamadas para avaliar, respectivamente, os fatos de contexto e processo dos antecedentes das regras e BOOLE-LST faz a verificação lógica do antecedente como um todo. Se a regra for satisfeita pelos fatos e ainda não foi queimada, a mesma é inserida na tabela *seleção*.

A função RES-CONFLITO é chamada por INFERENCIA sempre que existir regra na tabela *seleção*. RES-CONFLITO efetua a resolução de conflito, queimando a regra de menor índice que estiver em *seleção*. A mesma adiciona o consequente da

regra queimada em *fatos-novos*, insere a regra executada em *r-queimadas* e a remove de *regras*, o que impede sua execução futura no mesmo ciclo de diagnóstico.

Outras funções auxiliares foram desenvolvidas para leitura e gravação de dados em arquivo, para efetuar ações específicas dentro do processo de inferência ou para ampliar a capacidade de reconhecimento simbólico do sistema. No último caso, destacam-se as funções: QQ, MIN1, MAX1, TAXA e ANTES, que permitem ao sistema reconhecer que o antecedente de uma regra demanda uma avaliação diferenciada para ser considerado satisfeito. Essas avaliações específicas foram abordadas anteriormente, na seção 4.3.2, que descreve a base de conhecimento do modelo.

CAPÍTULO 5

RESULTADOS E ANÁLISES

Neste capítulo serão apresentados os testes realizados com o sistema especialista desenvolvido. Os resultados alcançados serão discutidos e comparados com os diagnósticos esperados de cada evento gerado. Será dado destaque ao comportamento temporal da planta nos cenários de teste e dos diagnósticos alcançados ao longo da evolução do acidente.

5.1. Introdução

Conforme já descrito no capítulo anterior, o sistema especialista proposto foi desenvolvido para diagnosticar um conjunto de acidentes selecionado a partir de todos os acidentes e operações anormais especificados no manual de identificação de acidentes da usina de Angra 2. A identificação do acidente é realizada em quatro níveis de diagnóstico, onde no nível 1 existem 2 possíveis diagnósticos, no nível 2 há 3 possíveis diagnósticos, no nível 3 são especificados 13 diferentes acidentes possíveis e seus respectivos manuais de operação e no nível 4 foram definidas 27 possíveis variantes dos acidentes.

O sistema proposto avalia, em ciclos de 10 segundos, um conjunto de variáveis de processo com o objetivo de determinar se a planta saiu de uma condição de operação normal para uma condição anormal ou acidente. Uma vez identificado que a planta está em condição anormal/acidente, o sistema inicia a fase de identificação do acidente, passando a avaliar, também a cada 10 segundos, um conjunto amplo de 64 variáveis de processo. A duração desta fase foi especificada para durar 5 minutos, ao fim da qual o sistema conclui a identificação do acidente.

Para realização dos testes foi utilizado o simulador de treinamento dos operadores de Angra 2. Cada cenário gerado pelo simulador é composto do intervalo de operação normal, a mudança para a condição de acidente e a evolução dos parâmetros ao longo do evento, com a resposta dos sistemas automáticos da planta. A condição inicial simulada para os cenários foi de operação a 100% da potência nominal, com o

ciclo do combustível no início de vida. As variáveis necessárias para o diagnóstico foram gravadas em arquivo, cobrindo o cenário até cinco minutos após o início do acidente. Posteriormente, o arquivo gerado é lido pelo sistema especialista proposto, que captura a cada 10 segundos as variáveis de processo, simulando uma monitoração em tempo real. Durante a fase de identificação, a cada ciclo de diagnóstico de 10 segundos, o sistema emite o diagnóstico alcançado com os dados disponíveis até aquele momento específico. Os diagnósticos de cada ciclo são gravados em arquivo texto para análise.

5.2. Cenários de Teste Utilizados

Foram gerados 18 cenários de acidentes para serem avaliados pelo sistema proposto. Cada um dos cenários será brevemente descrito a seguir:

- 1) Grande LOCA, ruptura 2A.

Cenário de ruptura em guilhotina da tubulação do primário de diâmetro de 750 mm. Área da ruptura equivalente a duas vezes a seção reta da tubulação. Rápida depressurização do primário, perda abrupta de inventário e atuação de várias ações automáticas do sistema de proteção do reator são características do acidente. A Figura 13 mostra o comportamento de quatro variáveis de processo importantes durante o evento. Observa-se a rápida depressurização do primário, perda de inventário e pressurização abrupta da contenção.

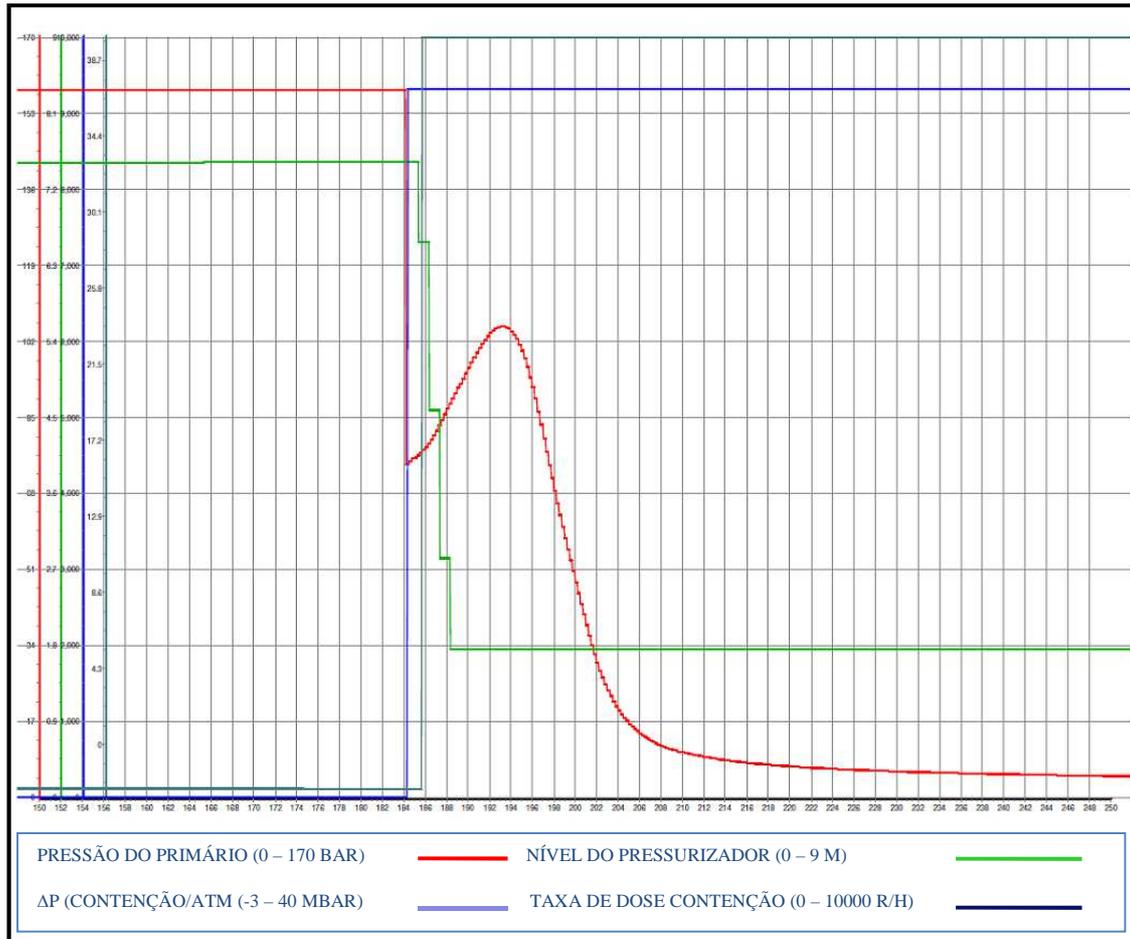


Figura 13 – Tendência de parâmetros importantes em LOCA 2A

2) LOCA, com ruptura de seção reta equivalente a 400 cm^2 .

Cenário considerado como LOCA médio, onde a pressão do primário cai até 9 bar ao longo de um período maior do que 200 segundos.

3) LOCA de seção reta de 50 cm^2 – Pode ser classificado como LOCA pequeno ou médio, pois está no limiar de classificação. Será classificado como pequeno se a pressão se mantiver acima de 9 bar, através das bombas de injeção de segurança e dos acumuladores.

4) LOCA de seção reta de 20 cm^2 – LOCA pequeno.

5) LOCA no espaço vapor do pressurizador de 38,5 cm² – a principal peculiaridade é a elevação do nível do pressurizador até sair da faixa de medição de nível.

6) LOCA de seção reta de 5 cm² - Pequeno LOCA. Caso limite para classificação entre fuga muito pequena e LOCA pequeno.

7) Ruptura do Primário com seção de reta de 2 cm² – Fuga muito pequena do primário. Não ocorrem os critérios de refrigeração de emergência do núcleo.

8) RTGV com ruptura de dois tubos – as ações automáticas da proteção do reator e limitação são atuadas rapidamente. A Figura 14 mostra a redução automática de potência a uma taxa de 20% por minuto, de 100% para 30% da potência nominal na fase inicial do acidente, seguida por uma depressurização do primário, também realizada automaticamente.

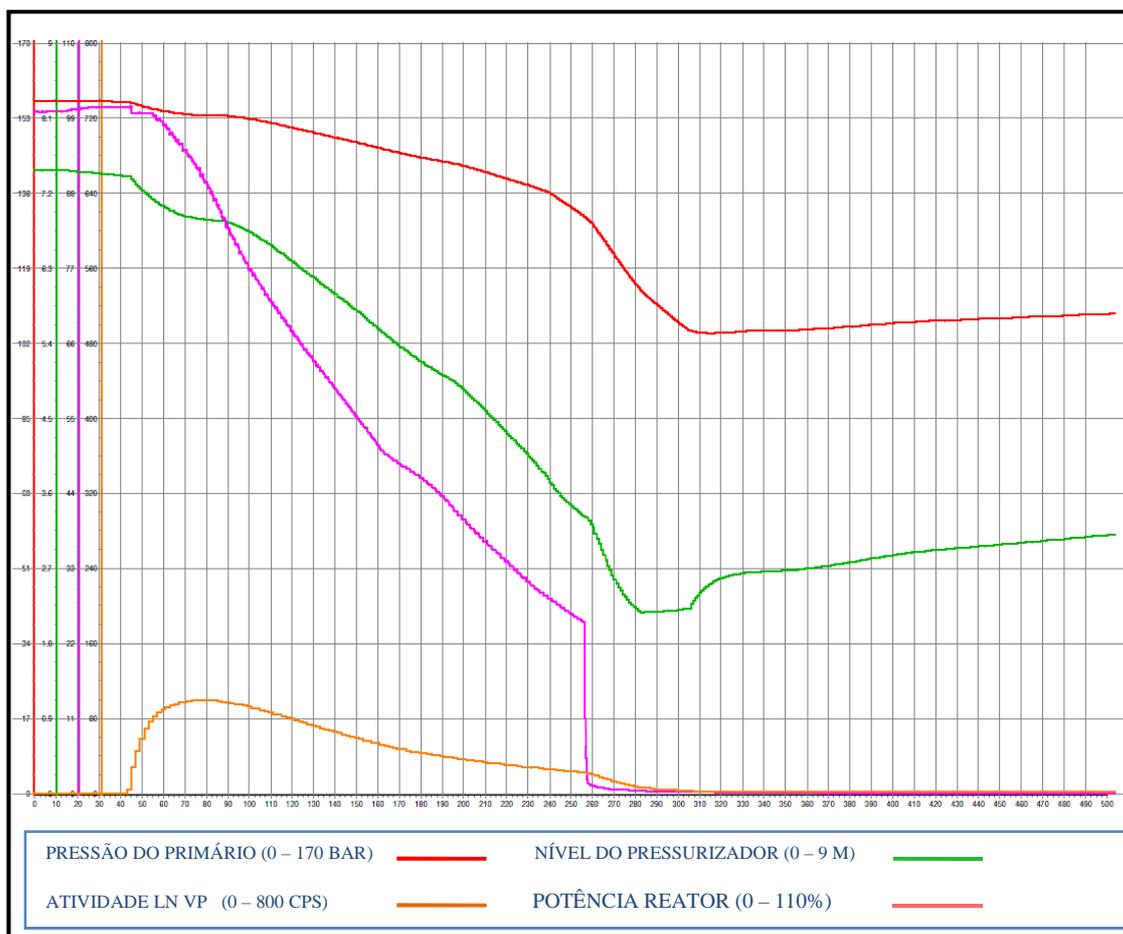


Figura 14 – Tendência de parâmetros importantes em RTGV de dois tubos

9) RTGV com ruptura de dois tubos e alimentação elétrica de emergência – RTGV com ocorrência de “blackout” durante ações automáticas.

10) RTGV com ruptura de um tubo – ocorrência das ações automáticas da limitação e proteção do reator.

11) RTGV com ruptura equivalente a 30% da seção reta de um tubo – atuação com retardo das ações automáticas da limitação e proteção do reator ao longo do evento.

12) RTGV com ruptura equivalente a 10% da seção reta de um tubo – pequena ruptura sem violação dos limites de atividade de vapor principal e, portanto, sem ações do sistema de proteção do reator relacionadas a RTGV. O nível do PZR permanece dentro da banda de controle.

13) Atuação espúria de sinal de RTGV – Os limites de atividade de vapor principal de um gerador de vapor são violados indevidamente, não havendo ruptura real, mas as ações automáticas ocorrem como se houvesse vazamento.

14) Quebra total de linha de vapor principal – quebra fora da contenção, à jusante das válvulas de bloqueio de vapor principal. Causa um rápido resfriamento do primário, desarme do reator e atuação das ações automáticas da proteção do reator, isolando a falha.

15) Quebra de linha de vapor principal equivalente a 30% da seção reta da tubulação – Despressurização mais lenta que o cenário anterior. Atuação da proteção do reator. A Figura 15 apresenta o comportamento de alguns dos parâmetros da planta. Destaca-se a contração do volume do refrigerante, refletida na redução do nível do pressurizador, causada pelo resfriamento do primário.

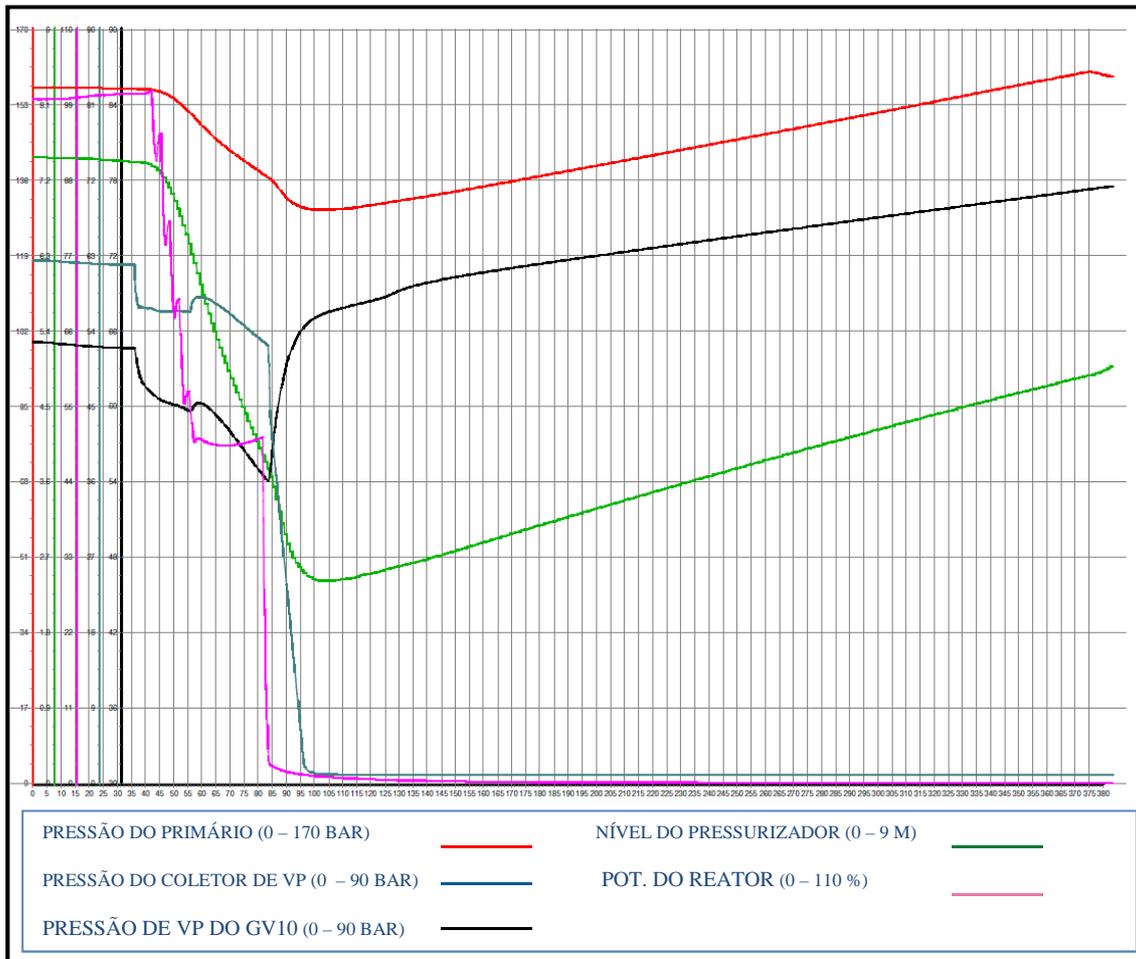


Figura 15 – Tendência de parâmetros importantes durante quebra de linha de VP

16) Quebra de linha de vapor principal equivalente a 10% da seção reta da tubulação – Causa resfriamento do primário e leva ao desarme do reator. O isolamento automático da falha ocorre após o desarme do reator.

17) Sinal espúrio de DAF1 – geração indevida de sinal que leva o sistema de proteção do reator a atuar como se houvesse uma ruptura real de linha de vapor principal.

18) Desarme de uma bomba de refrigeração do reator – Causa uma redução automática da potência do reator para 40% da potência nominal, entre outras ações automáticas. Este evento está fora do escopo de identificação do sistema desenvolvido. O mesmo deve emitir um diagnóstico do tipo “não sei”.

3) LOCA de seção reta de 50 cm².

Evento classificado como pequeno LOCA, pois as bombas de injeção de segurança são capazes de sobrepor o vazamento.

O diagnóstico foi correto desde o ciclo 3, para os quatro níveis, conforme Figura 18.

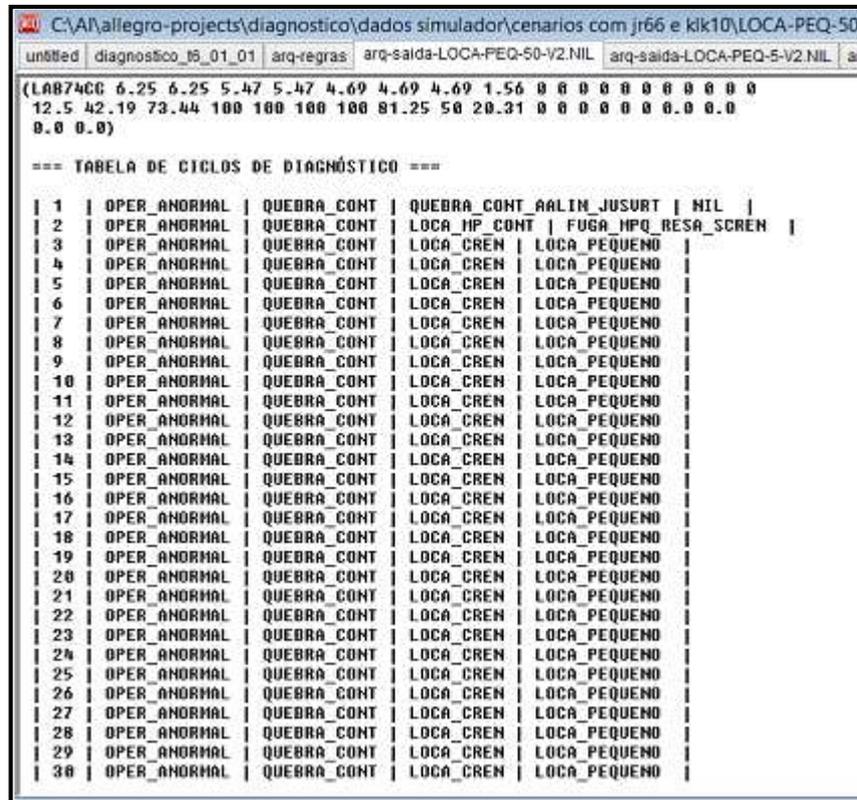


Figura 18 – Diagnósticos de um LOCA – 50 cm²

4) LOCA de seção reta de 20 cm².

Da mesma forma que o cenário anterior, este é um LOCA pequeno com atuação dos critérios de refrigeração de emergência do núcleo. De acordo com a Figura 19, o sistema proposto realizou o diagnóstico correto dos quatro níveis de diagnóstico a partir do ciclo 6, 1 minuto após o início do evento. Mais uma vez, destaca-se a necessidade de se eliminar os diagnósticos dos primeiros ciclos, quando os parâmetros ainda não assumiram tendências claras ou valores chave.

C:\AI\allegro-projects\diagnostico\dados simulador\cenarios com jr66 e ...

* arq-saida-LOCA-MED-400-V2.NIL * arq-saida-LOCA-PEQ-20-V2.NIL

0 0 0 0 2.34 31.25 60.94 92.19 100 100 100 80.47 50.78 19.53 0 0 0 0 0
0 0.0 0.0 0.0 0.0)

=== TABELA DE CICLOS DE DIAGNÓSTICO ===

1	OPER_ANDRHAL	QUEBRA_CONT	LOCA_HP_CONT	NIL
2	OPER_ANDRHAL	QUEBRA_CONT	LOCA_HP_CONT	FUGA_HPQ_RESA_SCREEN
3	OPER_ANDRHAL	QUEBRA_CONT	LOCA_HP_CONT	FUGA_HPQ_RESA_SCREEN
4	OPER_ANDRHAL	QUEBRA_CONT	LOCA_HP_CONT	FUGA_HPQ_RESA_SCREEN
5	OPER_ANDRHAL	QUEBRA_CONT	LOCA_HP_CONT	FUGA_HPQ_RESA_SCREEN
6	OPER_ANDRHAL	QUEBRA_CONT	LOCA_CREN	LOCA_PEQUENO
7	OPER_ANDRHAL	QUEBRA_CONT	LOCA_CREN	LOCA_PEQUENO
8	OPER_ANDRHAL	QUEBRA_CONT	LOCA_CREN	LOCA_PEQUENO
9	OPER_ANDRHAL	QUEBRA_CONT	LOCA_CREN	LOCA_PEQUENO
10	OPER_ANDRHAL	QUEBRA_CONT	LOCA_CREN	LOCA_PEQUENO
11	OPER_ANDRHAL	QUEBRA_CONT	LOCA_CREN	LOCA_PEQUENO
12	OPER_ANDRHAL	QUEBRA_CONT	LOCA_CREN	LOCA_PEQUENO
13	OPER_ANDRHAL	QUEBRA_CONT	LOCA_CREN	LOCA_PEQUENO
14	OPER_ANDRHAL	QUEBRA_CONT	LOCA_CREN	LOCA_PEQUENO
15	OPER_ANDRHAL	QUEBRA_CONT	LOCA_CREN	LOCA_PEQUENO
16	OPER_ANDRHAL	QUEBRA_CONT	LOCA_CREN	LOCA_PEQUENO
17	OPER_ANDRHAL	QUEBRA_CONT	LOCA_CREN	LOCA_PEQUENO
18	OPER_ANDRHAL	QUEBRA_CONT	LOCA_CREN	LOCA_PEQUENO
19	OPER_ANDRHAL	QUEBRA_CONT	LOCA_CREN	LOCA_PEQUENO
20	OPER_ANDRHAL	QUEBRA_CONT	LOCA_CREN	LOCA_PEQUENO
21	OPER_ANDRHAL	QUEBRA_CONT	LOCA_CREN	LOCA_PEQUENO
22	OPER_ANDRHAL	QUEBRA_CONT	LOCA_CREN	LOCA_PEQUENO
23	OPER_ANDRHAL	QUEBRA_CONT	LOCA_CREN	LOCA_PEQUENO
24	OPER_ANDRHAL	QUEBRA_CONT	LOCA_CREN	LOCA_PEQUENO
25	OPER_ANDRHAL	QUEBRA_CONT	LOCA_CREN	LOCA_PEQUENO
26	OPER_ANDRHAL	QUEBRA_CONT	LOCA_CREN	LOCA_PEQUENO
27	OPER_ANDRHAL	QUEBRA_CONT	LOCA_CREN	LOCA_PEQUENO
28	OPER_ANDRHAL	QUEBRA_CONT	LOCA_CREN	LOCA_PEQUENO
29	OPER_ANDRHAL	QUEBRA_CONT	LOCA_CREN	LOCA_PEQUENO
30	OPER_ANDRHAL	QUEBRA_CONT	LOCA_CREN	LOCA_PEQUENO

Figura 19 – Diagnósticos de um LOCA – 20 cm²

5) LOCA no espaço vapor do pressurizador de 38,5 cm².

Neste LOCA específico, o nível do pressurizador se eleva e a pressurização da contenção é mais rápida. Conforme Figura 20, o sistema identificou corretamente os quatro níveis de diagnóstico a partir do ciclo 9.

C:\AI\allegro-projects\diagnostico\dados simulador\cenarios com jr66 ...					
untitled arq-saida-LOCA-5-8MIN-V2.NIL					
16	OPER_ANORMAL	QUEBRA_CONT	LOCA_MP_CONT	NIL	
17	OPER_ANORMAL	QUEBRA_CONT	LOCA_MP_CONT	NIL	
18	OPER_ANORMAL	QUEBRA_CONT	LOCA_MP_CONT	NIL	
19	OPER_ANORMAL	QUEBRA_CONT	LOCA_MP_CONT	NIL	
20	OPER_ANORMAL	QUEBRA_CONT	LOCA_MP_CONT	NIL	
21	OPER_ANORMAL	QUEBRA_CONT	LOCA_MP_CONT	NIL	
22	OPER_ANORMAL	QUEBRA_CONT	LOCA_MP_CONT	NIL	
23	OPER_ANORMAL	QUEBRA_CONT	LOCA_MP_CONT	FUGA_MPQ_RESA_SCREEN	
24	OPER_ANORMAL	QUEBRA_CONT	LOCA_MP_CONT	FUGA_MPQ_RESA_SCREEN	
25	OPER_ANORMAL	QUEBRA_CONT	LOCA_MP_CONT	FUGA_MPQ_RESA_SCREEN	
26	OPER_ANORMAL	QUEBRA_CONT	LOCA_MP_CONT	FUGA_MPQ_RESA_SCREEN	
27	OPER_ANORMAL	QUEBRA_CONT	LOCA_MP_CONT	FUGA_MPQ_RESA_SCREEN	
28	OPER_ANORMAL	QUEBRA_CONT	LOCA_MP_CONT	FUGA_MPQ_RESA_SCREEN	
29	OPER_ANORMAL	QUEBRA_CONT	LOCA_MP_CONT	FUGA_MPQ_RESA_SCREEN	
30	OPER_ANORMAL	QUEBRA_CONT	LOCA_MP_CONT	FUGA_MPQ_RESA_SCREEN	
31	OPER_ANORMAL	QUEBRA_CONT	LOCA_MP_CONT	FUGA_MPQ_RESA_SCREEN	
32	OPER_ANORMAL	QUEBRA_CONT	LOCA_MP_CONT	FUGA_MPQ_RESA_SCREEN	
33	OPER_ANORMAL	QUEBRA_CONT	LOCA_MP_CONT	FUGA_MPQ_RESA_SCREEN	
34	OPER_ANORMAL	QUEBRA_CONT	LOCA_MP_CONT	FUGA_MPQ_RESA_SCREEN	
35	OPER_ANORMAL	QUEBRA_CONT	LOCA_MP_CONT	FUGA_MPQ_RESA_SCREEN	
36	OPER_ANORMAL	QUEBRA_CONT	LOCA_MP_CONT	FUGA_MPQ_RESA_SCREEN	
37	OPER_ANORMAL	QUEBRA_CONT	LOCA_CREN	LOCA_PEQUENO	
38	OPER_ANORMAL	QUEBRA_CONT	QUEBRA_CONT_AALIM_JUSURT	NIL	
39	OPER_ANORMAL	QUEBRA_CONT	LOCA_CREN	LOCA_PEQUENO	
40	OPER_ANORMAL	QUEBRA_CONT	LOCA_CREN	LOCA_PEQUENO	
41	OPER_ANORMAL	QUEBRA_CONT	LOCA_CREN	LOCA_PEQUENO	
42	OPER_ANORMAL	QUEBRA_CONT	LOCA_CREN	LOCA_PEQUENO	
43	OPER_ANORMAL	QUEBRA_CONT	LOCA_CREN	LOCA_PEQUENO	
44	OPER_ANORMAL	QUEBRA_CONT	LOCA_CREN	LOCA_PEQUENO	
45	OPER_ANORMAL	QUEBRA_CONT	LOCA_CREN	LOCA_PEQUENO	
46	OPER_ANORMAL	QUEBRA_CONT	LOCA_CREN	LOCA_PEQUENO	
47	OPER_ANORMAL	QUEBRA_CONT	LOCA_CREN	LOCA_PEQUENO	
48	OPER_ANORMAL	QUEBRA_CONT	LOCA_CREN	LOCA_PEQUENO	
49	OPER_ANORMAL	QUEBRA_CONT	LOCA_CREN	LOCA_PEQUENO	
50	OPER_ANORMAL	QUEBRA_CONT	LOCA_CREN	LOCA_PEQUENO	

Figura 21 – Diagnósticos de LOCA 5 cm²

7) Ruptura do Primário com seção reta de 2 cm².

Classificada como fuga muito pequena, que não leva ao desarme automático do reator, permanecendo o reator em potência. O desligamento, neste caso, é feito de forma manual, conforme requisitos do Manual de Operação e Especificações Técnicas. O sistema especialista proposto classificou corretamente os quatro níveis de diagnóstico desde o ciclo 5, de acordo com a Figura 22.


```

C:\AI\allegro-projects\diagnostico\dados simulador\cenarios com jr66 e kik10\cen
untitled diagnostico_t6_01_01 arq-regras arq-saida-LOCA-PEQ-50-V2NIL arq-saida-LOCA-PEQ-
(LAB74CG 24.22 28.91 53.13 82.81 100 71.88 40.63 10.94 0 0 0 0 0 0 0
0 12.5 32.03 40.63 53.13 63.28 66.41 63.28 57.03 49.22 19.53 0 0 0 0 0
0 0 0 0.0 0.0 0.0 0.0)

--- TABELA DE CICLOS DE DIAGNÓSTICO ---

| 1 | OPER_ANDRMAL | RTGV | RTGV_LIMUP | NIL |
| 2 | OPER_ANDRMAL | RTGV | RTGV_LIMUP | RTGV_LINUP_SCREEN_SBLACK |
| 3 | OPER_ANDRMAL | RTGV | RTGV_LIMUP | RTGV_LINUP_SCREEN_SBLACK |
| 4 | OPER_ANDRMAL | RTGV | RTGV_LIMUP | RTGV_LINUP_SCREEN_SBLACK |
| 5 | OPER_ANDRMAL | RTGV | RTGV_LIMUP | RTGV_LINUP_SCREEN_SBLACK |
| 6 | OPER_ANDRMAL | RTGV | RTGV_LIMUP | RTGV_LINUP_SCREEN_SBLACK |
| 7 | OPER_ANDRMAL | RTGV | RTGV_LIMUP | RTGV_LINUP_SCREEN_SBLACK |
| 8 | OPER_ANDRMAL | RTGV | RTGV_LIMUP | RTGV_LINUP_SCREEN_SBLACK |
| 9 | OPER_ANDRMAL | RTGV | RTGV_LIMUP | RTGV_LINUP_SCREEN_SBLACK |
| 10 | OPER_ANDRMAL | RTGV | RTGV_LIMUP | RTGV_LINUP_SCREEN_SBLACK |
| 11 | OPER_ANDRMAL | RTGV | RTGV_LIMUP | RTGV_LINUP_SCREEN_SBLACK |
| 12 | OPER_ANDRMAL | RTGV | RTGV_LIMUP | RTGV_LINUP_SCREEN_SBLACK |
| 13 | OPER_ANDRMAL | RTGV | RTGV_LIMUP | RTGV_LINUP_SCREEN_SBLACK |
| 14 | OPER_ANDRMAL | RTGV | RTGV_LIMUP | RTGV_LINUP_SCREEN_SBLACK |
| 15 | OPER_ANDRMAL | RTGV | RTGV_LIMUP | RTGV_LINUP_SCREEN_SBLACK |
| 16 | OPER_ANDRMAL | RTGV | RTGV_LIMUP | RTGV_LINUP_SCREEN_SBLACK |
| 17 | OPER_ANDRMAL | RTGV | RTGV_LIMUP | RTGV_LINUP_SCREEN_SBLACK |
| 18 | OPER_ANDRMAL | RTGV | RTGV_LIMUP | RTGV_LINUP_SCREEN_SBLACK |
| 19 | OPER_ANDRMAL | RTGV | RTGV_LIMUP | RTGV_LINUP_SCREEN_SBLACK |
| 20 | OPER_ANDRMAL | RTGV | RTGV_LIMUP | RTGV_LINUP_SCREEN_SBLACK |
| 21 | OPER_ANDRMAL | RTGV | RTGV_LIMUP | RTGV_LINUP_SCREEN_SBLACK |
| 22 | OPER_ANDRMAL | RTGV | RTGV_LIMUP | RTGV_LINUP_SCREEN_SBLACK |
| 23 | OPER_ANDRMAL | RTGV | RTGV_LIMUP | RTGV_LINUP_SCREEN_SBLACK |
| 24 | OPER_ANDRMAL | RTGV | RTGV_LIMUP | NIL |
| 25 | OPER_ANDRMAL | RTGV | RTGV_LIMUP | NIL |
| 26 | OPER_ANDRMAL | RTGV | RTGV_LIMUP | RTGV_LINUP_CREN_SBLACK |
| 27 | OPER_ANDRMAL | RTGV | RTGV_LIMUP | RTGV_LINUP_CREN_SBLACK |
| 28 | OPER_ANDRMAL | RTGV | RTGV_LIMUP | RTGV_LINUP_CREN_SBLACK |
| 29 | OPER_ANDRMAL | RTGV | RTGV_LIMUP | RTGV_LINUP_CREN_SBLACK |
| 30 | OPER_ANDRMAL | RTGV | RTGV_LIMUP | RTGV_LINUP_CREN_SBLACK |

```

Figura 23 – Diagnósticos de RTGV dois tubos

9) RTGV com ruptura de dois tubos e alimentação elétrica de emergência.

Cenário que envolve dois eventos concomitantes, RTGV e “blackout”. O sistema proposto identificou corretamente o acidente de RTGV, nos quatro níveis, antes da ocorrência do “blackout”. Observa-se na Figura 24 que nos 7 ciclos posteriores à perda de suprimento elétrico externo, observa-se que o diagnóstico retroagiu para o nível 3. Isto ocorreu devido à alteração de parâmetros e tendências da planta a partir do “blackout”, entre eles a pressurização momentânea da contenção. Para este cenário, o tempo de identificação foi estendido para 40 ciclos. Desta forma, observa-se que, após o ciclo 31, o sistema proposto retomou o diagnóstico correto do quarto nível, reconhecendo os dois acidentes concomitantes.

	OPER_ANORMAL	RTGV	RTGV_LINHUP	RTGV_LIMVP_SCREM_SBLACK
5	OPER_ANORMAL	RTGV	RTGV_LINHUP	RTGV_LIMVP_SCREM_SBLACK
6	OPER_ANORMAL	RTGV	RTGV_LINHUP	RTGV_LIMVP_SCREM_SBLACK
7	OPER_ANORMAL	RTGV	RTGV_LINHUP	RTGV_LIMVP_SCREM_SBLACK
8	OPER_ANORMAL	RTGV	RTGV_LINHUP	RTGV_LIMVP_SCREM_SBLACK
9	OPER_ANORMAL	RTGV	RTGV_LINHUP	RTGV_LIMVP_SCREM_SBLACK
10	OPER_ANORMAL	RTGV	RTGV_LINHUP	RTGV_LIMVP_SCREM_SBLACK
11	OPER_ANORMAL	RTGV	RTGV_LINHUP	RTGV_LIMVP_SCREM_SBLACK
12	OPER_ANORMAL	RTGV	RTGV_LINHUP	RTGV_LIMVP_SCREM_SBLACK
13	OPER_ANORMAL	RTGV	RTGV_LINHUP	RTGV_LIMVP_SCREM_SBLACK
14	OPER_ANORMAL	RTGV	RTGV_LINHUP	RTGV_LIMVP_SCREM_SBLACK
15	OPER_ANORMAL	RTGV	RTGV_LINHUP	RTGV_LIMVP_SCREM_SBLACK
16	OPER_ANORMAL	RTGV	RTGV_LINHUP	RTGV_LIMVP_SCREM_SBLACK
17	OPER_ANORMAL	RTGV	RTGV_LINHUP	RTGV_LIMVP_SCREM_SBLACK
18	OPER_ANORMAL	RTGV	RTGV_LINHUP	RTGV_LIMVP_SCREM_SBLACK
19	OPER_ANORMAL	RTGV	RTGV_LINHUP	RTGV_LIMVP_SCREM_SBLACK
20	OPER_ANORMAL	RTGV	RTGV_LINHUP	RTGV_LIMVP_SCREM_SBLACK
21	OPER_ANORMAL	RTGV	RTGV_LINHUP	RTGV_LIMVP_SCREM_SBLACK
22	OPER_ANORMAL	RTGV	RTGV_LINHUP	RTGV_LIMVP_SCREM_SBLACK
23	OPER_ANORMAL	RTGV	RTGV_LINHUP	RTGV_LIMVP_SCREM_SBLACK
24	OPER_ANORMAL	RTGV	RTGV_LINHUP	NIL
25	OPER_ANORMAL	RTGV	RTGV_LINHUP	NIL
26	OPER_ANORMAL	RTGV	RTGV_LINHUP	NIL
27	OPER_ANORMAL	RTGV	RTGV_LINHUP	NIL
28	OPER_ANORMAL	RTGV	RTGV_LINHUP	NIL
29	OPER_ANORMAL	RTGV	RTGV_LINHUP	NIL
30	OPER_ANORMAL	NIL	NIL	NIL
31	OPER_ANORMAL	RTGV	RTGV_LINHUP	RTGV_LIMVP_CREM_BLACK
32	OPER_ANORMAL	RTGV	RTGV_LINHUP	RTGV_LIMVP_CREM_BLACK
33	OPER_ANORMAL	RTGV	RTGV_LINHUP	RTGV_LIMVP_CREM_BLACK
34	OPER_ANORMAL	RTGV	RTGV_LINHUP	RTGV_LIMVP_CREM_BLACK
35	OPER_ANORMAL	RTGV	RTGV_LINHUP	RTGV_LIMVP_CREM_BLACK
36	OPER_ANORMAL	RTGV	RTGV_LINHUP	RTGV_LIMVP_CREM_BLACK
37	OPER_ANORMAL	RTGV	RTGV_LINHUP	RTGV_LIMVP_CREM_BLACK
38	OPER_ANORMAL	RTGV	RTGV_LINHUP	RTGV_LIMVP_CREM_BLACK
39	OPER_ANORMAL	RTGV	RTGV_LINHUP	RTGV_LIMVP_CREM_BLACK
40	OPER_ANORMAL	RTGV	RTGV_LINHUP	RTGV_LIMVP_CREM_BLACK

Figura 24 – Diagnósticos de RTGV com Blackout

10) RTGV com ruptura de um tubo.

RTGV com violação dos limites de atividade de vapor principal, sem atingir os critérios de refrigeração de emergência. Observa-se que o sistema desenvolvido efetuou corretamente o diagnóstico, nos quatro níveis, desde o primeiro ciclo. Conforme mostra a Figura 25, a classificação no nível 4 foi de RTGV com Violação dos Limites de Atividade de VP, sem CREM e sem Blackout.


```

C:\Allegro-projects\diagnostico\dados simulador\cenarios com jr66 e ...
* arq-saida-LOCA-MED-400-V2.NIL * arq-saida-LOCA-VAPOR-PZR-V2.NIL * arq-saida-RTGV-03T-V2.NIL
0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0
0.0 0.0 0.0 0.0 0.0

--- TABELA DE CICLOS DE DIAGNÓSTICO ---
| 1 | OPER_ANORMAL | RTGV | RTGV_SLINUP_SCREEN | RTGV_SLINUP_HPZRNL |
| 2 | OPER_ANORMAL | RTGV | RTGV_SLINUP_SCREEN | RTGV_SLINUP_HPZRNL |
| 3 | OPER_ANORMAL | RTGV | RTGV_SLINUP_SCREEN | RTGV_SLINUP_HPZRNL |
| 4 | OPER_ANORMAL | RTGV | RTGV_SLINUP_SCREEN | RTGV_SLINUP_HPZRNL |
| 5 | OPER_ANORMAL | RTGV | RTGV_SLINUP_SCREEN | RTGV_SLINUP_HPZRNL |
| 6 | OPER_ANORMAL | RTGV | RTGV_LINUP | NIL |
| 7 | OPER_ANORMAL | RTGV | RTGV_LINUP | NIL |
| 8 | OPER_ANORMAL | RTGV | RTGV_LINUP | NIL |
| 9 | OPER_ANORMAL | RTGV | RTGV_LINUP | NIL |
| 10 | OPER_ANORMAL | RTGV | RTGV_LINUP | NIL |
| 11 | OPER_ANORMAL | RTGV | RTGV_LINUP | NIL |
| 12 | OPER_ANORMAL | RTGV | RTGV_LINUP | NIL |
| 13 | OPER_ANORMAL | RTGV | RTGV_LINUP | NIL |
| 14 | OPER_ANORMAL | RTGV | RTGV_LINUP | NIL |
| 15 | OPER_ANORMAL | RTGV | RTGV_LINUP | RTGV_LINUP_SCREEN_SBLACK |
| 16 | OPER_ANORMAL | RTGV | RTGV_LINUP | RTGV_LINUP_SCREEN_SBLACK |
| 17 | OPER_ANORMAL | RTGV | RTGV_LINUP | NIL |
| 18 | OPER_ANORMAL | RTGV | RTGV_LINUP | NIL |
| 19 | OPER_ANORMAL | RTGV | RTGV_LINUP | RTGV_LINUP_SCREEN_SBLACK |
| 20 | OPER_ANORMAL | RTGV | RTGV_LINUP | RTGV_LINUP_SCREEN_SBLACK |
| 21 | OPER_ANORMAL | RTGV | RTGV_LINUP | RTGV_LINUP_SCREEN_SBLACK |
| 22 | OPER_ANORMAL | RTGV | RTGV_LINUP | RTGV_LINUP_SCREEN_SBLACK |
| 23 | OPER_ANORMAL | RTGV | RTGV_LINUP | RTGV_LINUP_SCREEN_SBLACK |
| 24 | OPER_ANORMAL | RTGV | RTGV_LINUP | RTGV_LINUP_SCREEN_SBLACK |
| 25 | OPER_ANORMAL | RTGV | RTGV_LINUP | RTGV_LINUP_SCREEN_SBLACK |
| 26 | OPER_ANORMAL | RTGV | RTGV_LINUP | RTGV_LINUP_SCREEN_SBLACK |
| 27 | OPER_ANORMAL | RTGV | RTGV_LINUP | RTGV_LINUP_SCREEN_SBLACK |
| 28 | OPER_ANORMAL | RTGV | RTGV_LINUP | RTGV_LINUP_SCREEN_SBLACK |
| 29 | OPER_ANORMAL | RTGV | RTGV_LINUP | RTGV_LINUP_SCREEN_SBLACK |
| 30 | OPER_ANORMAL | RTGV | RTGV_LINUP | RTGV_LINUP_SCREEN_SBLACK |

```

Figura 26 – Diagnósticos de RTGV – 0,3 de tubo

12) RTGV com ruptura equivalente a 10% da seção reta de um tubo.

Este é um cenário de pequena ruptura de tubo de GV. Os monitores de atividade de vapor principal e da exaustão do condensador são sensibilizados, mas não são violados os limites de atividade do sistema de proteção do reator. As bombas de carregamento de alta pressão do primário conseguem compensar o vazamento, mantendo o nível do pressurizador dentro da banda de controle. Não são atingidos os critérios de refrigeração de emergência.

O sistema proposto, como mostra a Figura 27, identificou corretamente os 4 níveis de diagnóstico desde o primeiro ciclo.


```

0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0
0.0 0.0 0.0 0.0 0.0

--- TABELA DE CICLOS DE DIAGNÓSTICO ---
| 1 | EVENTO_NAO_IDENTIFICADO | NIL | NIL | NIL |
| 2 | EVENTO_NAO_IDENTIFICADO | NIL | NIL | NIL |
| 3 | EVENTO_NAO_IDENTIFICADO | NIL | NIL | NIL |
| 4 | EVENTO_NAO_IDENTIFICADO | NIL | NIL | NIL |
| 5 | OPER_ANORMAL | QUEBRA_UP_FORA | QUEBRA_UP_JUS | NIL |
| 6 | OPER_ANORMAL | QUEBRA_UP_FORA | QUEBRA_UP_JUS | NIL |
| 7 | OPER_ANORMAL | QUEBRA_UP_FORA | QUEBRA_UP_JUS | NIL |
| 8 | OPER_ANORMAL | QUEBRA_UP_FORA | QUEBRA_UP_JUS | NIL |
| 9 | OPER_ANORMAL | QUEBRA_UP_FORA | QUEBRA_UP_JUS | NIL |
| 10 | OPER_ANORMAL | QUEBRA_UP_FORA | QUEBRA_UP_JUS | NIL |
| 11 | OPER_ANORMAL | QUEBRA_UP_FORA | QUEBRA_UP_JUS | NIL |
| 12 | OPER_ANORMAL | QUEBRA_UP_FORA | QUEBRA_UP_JUS | NIL |
| 13 | OPER_ANORMAL | QUEBRA_UP_FORA | QUEBRA_UP_JUS | NIL |
| 14 | OPER_ANORMAL | QUEBRA_UP_FORA | QUEBRA_UP_JUS | NIL |
| 15 | OPER_ANORMAL | QUEBRA_UP_FORA | QUEBRA_UP_JUS | NIL |
| 16 | OPER_ANORMAL | QUEBRA_UP_FORA | QUEBRA_UP_JUS | NIL |
| 17 | OPER_ANORMAL | QUEBRA_UP_FORA | QUEBRA_UP_JUS | NIL |
| 18 | OPER_ANORMAL | QUEBRA_UP_FORA | QUEBRA_UP_JUS | NIL |
| 19 | OPER_ANORMAL | QUEBRA_UP_FORA | QUEBRA_UP_JUS | NIL |
| 20 | OPER_ANORMAL | QUEBRA_UP_FORA | QUEBRA_UP_JUS | NIL |
| 21 | OPER_ANORMAL | QUEBRA_UP_FORA | QUEBRA_UP_JUS | NIL |
| 22 | OPER_ANORMAL | QUEBRA_UP_FORA | QUEBRA_UP_JUS | NIL |
| 23 | OPER_ANORMAL | QUEBRA_UP_FORA | QUEBRA_UP_JUS | NIL |
| 24 | OPER_ANORMAL | QUEBRA_UP_FORA | QUEBRA_UP_JUS | NIL |
| 25 | OPER_ANORMAL | QUEBRA_UP_FORA | QUEBRA_UP_JUS | NIL |
| 26 | OPER_ANORMAL | QUEBRA_UP_FORA | QUEBRA_UP_JUS | NIL |
| 27 | OPER_ANORMAL | QUEBRA_UP_FORA | QUEBRA_UP_JUS | NIL |
| 28 | OPER_ANORMAL | QUEBRA_UP_FORA | QUEBRA_UP_JUS | NIL |
| 29 | OPER_ANORMAL | QUEBRA_UP_FORA | QUEBRA_UP_JUS | NIL |
| 30 | OPER_ANORMAL | QUEBRA_UP_FORA | QUEBRA_UP_JUS | NIL |

```

Figura 30 – Diagnósticos de Quebra 30% linha de VP

16) Quebra de linha de vapor principal equivalente a 10% da seção reta da tubulação.

Neste cenário, conforme Figura 31, o sistema reconheceu corretamente o evento a partir do ciclo 22. Esse evento, trata-se de uma ruptura menor de linha de vapor principal que leva a atuação do sistema de proteção do reator com retardo. O sistema especialista proposto foi desenvolvido para identificar os transientes de sobrerresfriamento causados pelo secundário que levam ao desarme do reator e posterior atuação do isolamento da falha (DAF1). Portanto, como se pode observar, o diagnóstico correto ocorreu após a atuação da proteção do reator, conforme previsto.


```

100.0 100.0 100.0 100.0 100.0 94.53 75.78 44.53 14.84 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0
0.0 0.0 0.0 0.0)

=== TABELA DE CICLOS DE DIAGNÓSTICO ===
| 1 | OPER_ANORMAL | QUEBRA_UP_FORA | DAF1_ESPURIO | NIL |
| 2 | OPER_ANORMAL | QUEBRA_UP_FORA | DAF1_ESPURIO | NIL |
| 3 | OPER_ANORMAL | QUEBRA_UP_FORA | DAF1_ESPURIO | NIL |
| 4 | OPER_ANORMAL | QUEBRA_UP_FORA | DAF1_ESPURIO | NIL |
| 5 | OPER_ANORMAL | QUEBRA_UP_FORA | DAF1_ESPURIO | NIL |
| 6 | OPER_ANORMAL | QUEBRA_UP_FORA | DAF1_ESPURIO | NIL |
| 7 | OPER_ANORMAL | QUEBRA_UP_FORA | DAF1_ESPURIO | NIL |
| 8 | OPER_ANORMAL | QUEBRA_UP_FORA | DAF1_ESPURIO | NIL |
| 9 | OPER_ANORMAL | QUEBRA_UP_FORA | DAF1_ESPURIO | NIL |
| 10 | OPER_ANORMAL | QUEBRA_UP_FORA | DAF1_ESPURIO | NIL |
| 11 | OPER_ANORMAL | QUEBRA_UP_FORA | DAF1_ESPURIO | NIL |
| 12 | OPER_ANORMAL | QUEBRA_UP_FORA | DAF1_ESPURIO | NIL |
| 13 | OPER_ANORMAL | QUEBRA_UP_FORA | DAF1_ESPURIO | NIL |
| 14 | OPER_ANORMAL | QUEBRA_UP_FORA | DAF1_ESPURIO | NIL |
| 15 | OPER_ANORMAL | QUEBRA_UP_FORA | DAF1_ESPURIO | NIL |
| 16 | OPER_ANORMAL | QUEBRA_UP_FORA | DAF1_ESPURIO | NIL |
| 17 | OPER_ANORMAL | QUEBRA_UP_FORA | DAF1_ESPURIO | NIL |
| 18 | OPER_ANORMAL | QUEBRA_UP_FORA | DAF1_ESPURIO | NIL |
| 19 | OPER_ANORMAL | QUEBRA_UP_FORA | DAF1_ESPURIO | NIL |
| 20 | OPER_ANORMAL | QUEBRA_UP_FORA | DAF1_ESPURIO | NIL |
| 21 | OPER_ANORMAL | QUEBRA_UP_FORA | DAF1_ESPURIO | NIL |
| 22 | OPER_ANORMAL | QUEBRA_UP_FORA | DAF1_ESPURIO | NIL |
| 23 | OPER_ANORMAL | QUEBRA_UP_FORA | DAF1_ESPURIO | NIL |
| 24 | OPER_ANORMAL | QUEBRA_UP_FORA | DAF1_ESPURIO | NIL |
| 25 | OPER_ANORMAL | QUEBRA_UP_FORA | DAF1_ESPURIO | NIL |
| 26 | OPER_ANORMAL | QUEBRA_UP_FORA | DAF1_ESPURIO | NIL |
| 27 | OPER_ANORMAL | QUEBRA_UP_FORA | DAF1_ESPURIO | NIL |
| 28 | OPER_ANORMAL | QUEBRA_UP_FORA | DAF1_ESPURIO | NIL |
| 29 | OPER_ANORMAL | QUEBRA_UP_FORA | DAF1_ESPURIO | NIL |
| 30 | OPER_ANORMAL | QUEBRA_UP_FORA | DAF1_ESPURIO | NIL |

```

Figura 32 – Diagnósticos de Ativação Espúria de DAF1

18) Desarme de uma Bomba de Refrigeração do Reator (BRR).

Este cenário se encontra fora do escopo de diagnóstico do sistema desenvolvido. Com ele testou-se a resposta do tipo “não-sei”. O sistema reconheceu a anormalidade e emitiu corretamente a resposta de “evento não identificado” desde o primeiro ciclo de diagnóstico, conforme mostra a Figura 33.

Os cinco minutos definidos como intervalo para identificação dos quatro níveis de diagnóstico se mostraram suficientes para a maioria dos cenários. Entretanto, nos eventos de pequenas rupturas, onde a evolução dos parâmetros é gradual, é necessário que o tempo de diagnóstico seja estendido, uma vez que, dentro dos cinco minutos propostos, os parâmetros da planta estão se alterando substancialmente e ações automáticas podem ainda ser iniciadas.

Os principais cenários testados com variação gradual de parâmetros, em que o tempo proposto de cinco minutos se mostrou reduzido, foram:

- LOCA – 5 cm², onde o sistema alterou corretamente o diagnóstico dos níveis 3 e 4 a partir do ciclo 39, quando foram alcançados os critérios de refrigeração de emergência, sendo mantido o diagnóstico correto a partir desse ciclo.

- Quebra de linha de VP – 10%, onde sinais automáticos ocorreram no quarto minuto de identificação.

Igualmente, para alguns cenários de RTGV, onde ações automáticas podem acontecer com retardo próximo de cinco minutos, alterando o diagnóstico, recomenda-se a extensão do tempo. Um exemplo foi o cenário de RTGV com “blackout”, onde o desarme do reator ocorreu seguido de um “blackout”. Após este, o sistema especialista proposto suprimiu o diagnóstico de nível 4 durante alguns ciclos, assumindo corretamente o novo diagnóstico já após os cinco minutos. Para este cenário, foi possível estender o tempo de identificação de 30 para 40 ciclos, sendo o diagnóstico correto mantido até o final da identificação.

Para os casos acima, o descarte dos diagnósticos iniciais e a extensão do tempo de identificação são medidas suficientes para assegurar que o diagnóstico correto seja alcançado.

As Tabelas 3 a 6 a seguir apresentam uma visão geral dos resultados alcançados com o sistema proposto, separados por níveis de diagnóstico, destacando-se o intervalo de tempo transcorrido desde o início do evento para o sistema alcançar o diagnóstico esperado.

Tabela 3 – Resultados de Nível 1 de Diagnóstico

Cenários	Diagnósticos Esperados no Nível 1	
	Diagnóstico Esperado	Tempo para alcançar o diagnóstico
Grande LOCA - 2A	Operação Anormal/Acidente	10 segundos
LOCA - 400 cm ²	Operação Anormal/Acidente	10 segundos
LOCA - 50 cm ²	Operação Anormal/Acidente	10 segundos
LOCA - 20 cm ²	Operação Anormal/Acidente	10 segundos
LOCA espaço vapor do PZR	Operação Anormal/Acidente	10 segundos
LOCA - 5 cm ²	Operação Anormal/Acidente	10 segundos
Ruptura do Primário - 2 cm ²	Operação Anormal/Acidente	10 segundos
RTGV - 2 tubos	Operação Anormal/Acidente	10 segundos
RTGV - 2 tubos e blackout	Operação Anormal/Acidente	10 segundos
RTGV - 1 tubo	Operação Anormal/Acidente	10 segundos
RTGV – 0,3 de um tubo	Operação Anormal/Acidente	10 segundos
RTGV – 0,1 de um tubo	Operação Anormal/Acidente	10 segundos
Sinal Espúrio RTGV	Operação Anormal/Acidente	10 segundos
Quebra 100% de linha de VP	Operação Anormal/Acidente	10 segundos
Quebra 30% de linha de VP	Operação Anormal/Acidente	50 segundos
Quebra 10% de linha de VP	Operação Anormal/Acidente	220 segundos
Sinal Espúrio de DAF1	Operação Anormal/Acidente	10 segundos
Desarme de BRR	Evento Não Identificado – resposta “não sei”	10 segundos

Tabela 4 – Resultados de Nível 2 de Diagnóstico

Diagnósticos Esperados no Nível 2		
Cenários	Diagnóstico Esperado	Tempo para alcançar o diagnóstico
Grande LOCA - 2A	Quebra do Primário ou Secundário na Contenção	10 segundos
LOCA - 400 cm ²	Quebra do Primário ou Secundário na Contenção	10 segundos
LOCA - 50 cm ²	Quebra do Primário ou Secundário na Contenção	10 segundos
LOCA - 20 cm ²	Quebra do Primário ou Secundário na Contenção	10 segundos
LOCA espaço vapor do PZR	Quebra do Primário ou Secundário na Contenção	10 segundos
LOCA - 5 cm ²	Quebra do Primário ou Secundário na Contenção	10 segundos
Ruptura do Primário - 2 cm ²	Quebra do Primário ou Secundário na Contenção	10 segundos
RTGV - 2 tubos	Ruptura de Tubo de Gerador de Vapor	10 segundos
RTGV - 2 tubos e blackout	Ruptura de Tubo de Gerador de Vapor	10 segundos
RTGV - 1 tubo	Ruptura de Tubo de Gerador de Vapor	10 segundos
RTGV – 0,3 de um tubo	Ruptura de Tubo de Gerador de Vapor	10 segundos
RTGV – 0,1 de um tubo	Ruptura de Tubo de Gerador de Vapor	10 segundos
Sinal Espúrio RTGV	Ruptura de Tubo de Gerador de Vapor	10 segundos
Quebra 100% de linha de VP	Quebra de linha de Vapor Principal fora da Contenção	10 segundos
Quebra 30% de linha de VP	Quebra de linha de Vapor Principal fora da Contenção	50 segundos
Quebra 10% de linha de VP	Quebra de linha de Vapor Principal fora da Contenção	220 segundos
Sinal Espúrio de DAF1	Quebra de linha de Vapor Principal fora da Contenção	10 segundos
Desarme de BRR	N/A – não aplicável	N/A

Tabela 5 – Resultados de Nível 3 de Diagnóstico

Cenários	Diagnósticos Esperados no Nível 3	
	Diagnóstico Esperado	Tempo para alcançar o diagnóstico
Grande LOCA - 2A	LOCA com Critérios de Refrigeração Atingidos	10 segundos
LOCA - 400 cm ²	LOCA com Critérios de Refrigeração Atingidos	10 segundos
LOCA - 50 cm ²	LOCA com Critérios de Refrigeração Atingidos	30 segundos
LOCA - 20 cm ²	LOCA com Critérios de Refrigeração Atingidos	60 segundos
LOCA espaço vapor do PZR	LOCA com Critérios de Refrigeração Atingidos	50 segundos
LOCA - 5 cm ²	LOCA com Critérios de Refrigeração Atingidos	390 segundos
Ruptura do Primário - 2 cm ²	LOCA muito Pequeno na Contenção	50 segundos
RTGV - 2 tubos	RTGV com Violação dos Limites de Atividade de VP	10 segundos
RTGV - 2 tubos e blackout	RTGV com Violação dos Limites de Atividade de VP	10 segundos
RTGV - 1 tubo	RTGV com Violação dos Limites de Atividade de VP	10 segundos
RTGV – 0,3 de um tubo	RTGV com Violação dos Limites de Atividade de VP	60 segundos
RTGV – 0,1 de um tubo	RTGV sem Violação dos Limites de Atividade de VP e sem Atingir Critérios de Refr. De Emergência	10 segundos
Sinal Espúrio RTGV	Ativação Espúria dos Sinais de Atividade de Vapor Principal	40 segundos
Quebra 100% de linha de VP	Quebra de linha de Vapor Principal a jusante da Válvula de Bloqueio de VP	10 segundos
Quebra 30% de linha de VP	Quebra de linha de Vapor Principal a jusante da Válvula de Bloqueio de VP	50 segundos
Quebra 10% de linha de VP	Transiente de Sobre-resfriamento Causado por Falha no Secundário	220 segundos
Sinal Espúrio de DAF1	Iniciação Espúria do Sinal DAF1	10 segundos
Desarme de BRR	N/A – não aplicável	N/A

Tabela 6 – Resultados de Nível 4 de Diagnóstico

Diagnósticos Esperados no Nível 4		
Cenários	Diagnóstico Esperado	Tempo para alcançar o diagnóstico
Grande LOCA - 2A	LOCA Grande	40 segundos
LOCA - 400 cm ²	LOCA Médio	150 segundos
LOCA - 50 cm ²	LOCA Pequeno	30 segundos
LOCA - 20 cm ²	LOCA Pequeno	60 segundos
LOCA espaço vapor do PZR	LOCA no Espaço Vapor do Pressurizador	90 segundos
LOCA - 5 cm ²	LOCA Pequeno	390 segundos
Ruptura do Primário - 2 cm ²	Fuga Muito Pequena do Primário	50 segundos
RTGV - 2 tubos	RTGV com Violação dos Limites de Atividade de VP, sem Critérios de Refr. de Emergência Atingidos (CREN) e sem Blackout. (Antes da ocorrência dos CREN).	20 segundos
	RTGV com Violação dos Limites de Atividade de VP, com CREN e sem Blackout. (Após a ocorrência dos CREN).	30 segundos
RTGV - 2 tubos e blackout	RTGV com Violação dos Limites de Atividade de VP, sem CREN e sem Blackout. (Antes da ocorrência do blackout).	10 segundos
	RTGV com Violação dos Limites de Atividade de VP, com CREN e com Blackout. (Após ocorrência do blackout)	70 segundos
RTGV - 1 tubo	RTGV com Violação dos Limites de Atividade de VP, Sem CREN e Sem Blackout	10 segundos
RTGV – 0,3 de um tubo	RTGV com Violação dos Limites de Atividade de VP, Sem CREN e Sem Blackout	190 segundos
RTGV – 0,1 de um tubo	RTGV sem Violação dos Limites de Atividade de VP, Com Nível do PZR dentro da Banda Morta	10 segundos
Sinal Espúrio RTGV	N/A – Não existe nível 4 para este acidente	N/A
Quebra 100% de linha de VP	N/A – Não existe nível 4 para este acidente	N/A
Quebra 30% de linha de VP	N/A – Não existe nível 4 para este acidente	N/A
Quebra 10% de linha de VP	Transiente de Sobrerresfriamento Causado por Falha no Secundário (confirmação)	220 segundos
Sinal Espúrio de DAF1	N/A – Não existe nível 4 para este acidente	N/A
Desarme de BRR	N/A – não aplicável	N/A

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

6.1. Conclusões

Este trabalho surge da motivação em desenvolver um sistema inteligente avançado de suporte aos operadores, capaz de monitorar em tempo real os parâmetros operacionais da usina nuclear de Angra 2 e efetuar o diagnóstico de todas as operações anormais e acidentes postulados de ocorrerem, de forma a identificar com precisão o evento em andamento e apresentar os resultados de forma clara e coerente, contribuindo para reforçar a tomada de decisão das equipes de operação.

O trabalho consiste no desenvolvimento de um sistema especialista que efetua o diagnóstico de um conjunto de acidentes escolhidos, utilizando uma base de conhecimento que incorpora a extensa quantidade de informações técnicas utilizadas pelos operadores no diagnóstico de eventos. O sistema proposto identifica o evento em níveis de diagnóstico progressivos, da mesma forma como é realizada a identificação de acidentes pelas equipes de operação em treinamento de simulador.

Observou-se neste trabalho que a utilização da técnica Sistema Especialista foi bem-sucedida, contribuindo para que os objetivos do trabalho fossem alcançados. A independência entre a base de conhecimento e o motor de inferência foi fundamental para viabilizar o gerenciamento do grande volume de dados técnicos inseridos na base de conhecimento. Ao longo do desenvolvimento do trabalho, esta base foi constantemente alterada, seja para incorporar novas regras, seja para aperfeiçoar as já existentes. As alterações foram realizadas sem que fosse necessário modificar o motor de inferência do sistema especialista.

A representação do conhecimento utilizando regras do tipo *se ... então* permitiu que o conhecimento estivesse sempre apresentado de forma clara na base de conhecimento, facilitando de forma decisiva as análises dos encadeamentos de

inferência ao longo dos testes realizados. Devido a essa clareza, as regras selecionadas ou não selecionadas puderam ser avaliadas tecnicamente ciclo a ciclo, o que possibilitou uma visão completa das inferências realizadas ao longo da identificação do evento.

O tratamento da incerteza utilizando o princípio da lógica de três valores se mostrou efetivo e evitou que os diagnósticos entre ciclos se alternassem com frequência. Em momentos de cenários de teste onde ocorreram variações de parâmetros operacionais, o tratamento da incerteza levou o sistema proposto a retroagir o diagnóstico de nível 4 para nível 3, evitando um possível diagnóstico errado em nível 4. A simplicidade da lógica de três valores também facilitou a análise do comportamento do sistema ao longo dos testes efetuados, permitindo determinar quais regras foram ou não selecionadas, conforme o cenário do acidente evoluía.

A linguagem Lisp, utilizada na implementação do sistema proposto, contribuiu de forma significativa para o sucesso do trabalho. A facilidade de manipulação e interpretação simbólica, inerente à linguagem, aliada ao fato de que o ambiente Lisp permite que testes sejam feitos em partes do código de forma imediata, sem necessidade de compilação, foram fatores de destaque ao longo do desenvolvimento do trabalho.

Os resultados dos testes, apresentados no capítulo 5, demonstraram que o sistema proposto é capaz de efetuar a identificação dos acidentes propostos, desde o nível 1 ao nível 4 de diagnóstico. Os resultados apresentaram estabilidade de diagnósticos ao longo dos ciclos. As alterações que ocorrem foram respostas corretas do sistema a alterações das condições da planta ao longo do evento. Como mencionado no capítulo 5, mesmo em um cenário com ocorrência de dois eventos subsequentes, RTGV com “blackout”, o sistema alcançou o diagnóstico correto.

Os testes apresentados no capítulo 5 mostram que, em alguns casos, é necessário descartar os diagnósticos alcançados nos primeiros ciclos, uma vez que os parâmetros da planta ainda não apresentam uma tendência definida. Um exemplo foi o cenário de LOCA médio de 400 cm^2 , onde o nível 4 de diagnóstico foi alcançado cerca de 2 minutos após o início do evento. Por outro lado, ocorreram casos em o tempo definido de 5 minutos se mostrou curto, uma vez que o diagnóstico correto foi alcançado nos últimos ciclos ou após cinco minutos, devido à tendência lenta dos parâmetros da planta

em rupturas menores. Um exemplo desse caso foi o LOCA pequeno de 5 cm², onde o quarto nível de diagnóstico foi alcançado após 6 minutos do início do evento.

De forma semelhante, cenários que se classificam em um diagnóstico, mas estão no limiar de classificação para outro diagnóstico, demandam que o sistema proposto avalie a evolução dos parâmetros da planta por um tempo maior do que cinco minutos. Um exemplo seria o de LOCA médio com ruptura de seção próxima a de um LOCA pequeno.

Portanto, a partir das avaliações dos resultados realizadas, é recomendável descartar os diagnósticos dos dois primeiros minutos e estender o tempo de identificação para 15 minutos do início do evento.

Conclui-se, por fim, que o Sistema Especialista desenvolvido alcançou os objetivos desejados. Ao longo dos testes, os diagnósticos parciais são emitidos conforme o evento se desenrola e determinadas condições são atingidas. Uma avaliação da evolução temporal desses diagnósticos parciais permite perceber que o sistema proposto emula a forma de diagnosticar utilizada pelas equipes de operação, demonstrando que o sistema absorveu corretamente o conhecimento e parte da heurística de diagnóstico dos operadores.

6.2. Sugestões para Trabalhos Futuros

A seguir são apresentadas algumas sugestões de trabalhos, tanto para aperfeiçoamento do trabalho atual, como para utilização de inteligência artificial em possíveis aplicações na usina de Angra 2.

Para o aperfeiçoamento do trabalho atual sugere-se:

- 1) Expansão do escopo de diagnóstico para todos os eventos previstos nas duas árvores lógicas de diagnóstico.
- 2) Expansão do escopo de diagnóstico para um quinto nível de diagnóstico, qual seja, a identificação do componente falhado, quando houver. Exemplo: identificar o gerador de vapor que estiver rompido e qual a taxa inicial de vazamento.

3) Avaliar a aplicação de outra técnica de inteligência artificial para ser utilizada quando o sistema especialista baseado em regras demandar. Exemplo seria utilizar uma rede neural para determinar a classificação de uma ruptura entre LOCA médio ou LOCA pequeno, quando a ruptura estiver no limiar dos dois. O sistema especialista acionaria a rede para efetuar este diagnóstico específico.

A técnica de sistema especialista pode ser utilizada para auxiliar os supervisores de turno no processo de classificação de emergências. O sistema incorporaria as regras de classificação, e o mesmo interagiria com o usuário, facilitando a identificação da classe de emergência nos quatro tipos existentes: evento não usual, alerta, emergência de área e emergência geral.

Existe a possibilidade de aplicação de inteligência artificial apenas para eventos específicos. Um exemplo seria o evento, que não envolve a parte nuclear da planta, de ruptura de tubo de condensador, onde água do mar contamina o circuito secundário, podendo forçar o desligamento manual da planta por perda das condições químicas do secundário. Neste caso, um sistema especialista pode monitorar em tempo real os parâmetros necessários para o diagnóstico de qual das seis semicaixas do condensador está com tubo rompido. Este diagnóstico seria uma importante ferramenta para tomada de decisão momentos após o início do evento, minimizando a contaminação do secundário com água do mar.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] International Atomic Energy Agency, *The Potential of Knowledge Based Systems in Nuclear Installations*. IAEA-TECDOC-700, Erlangen, Germany, 1993.
- [2] REIFMAN, J. “Survey of Artificial Intelligence Methods for Detection and Identification of Component Faults in Nuclear Power Plants”, *Nuclear Technology*, v. 119, pp. 76-97, Jul. 1997.
- [3] NABESHIMA K., SUZUDO T., OHNO T., *et. al.*, “Nuclear Reactor Monitoring with the Combination of Neural Network and Expert System”, *Mathematics and Computers in Simulation* 60, pp. 233-244, 2002.
- [4] MEDEIROS J., SCHIRRU R., “Identification of Nuclear Power Plant Transients Using the Particle Swarm Optimization Algorithm”, In: *Annals of Nuclear Energy*, v.35, pp. 576-582, 2008.
- [5] NICOLAU, A., SCHIRRU, R., MENESES, A., “Quantum Evolutionary Algorithm Applied to Transient Identification of a Nuclear Power Plant”, *Progress in Nuclear Energy*, vol. 53, issue 1, pp. 86-91, 2011.
- [6] LUGER, G., *Artificial Intelligence, Structures and Strategies for Complex Problem Solving*, 6 ed., Boston, Pearson Education, 2008.
- [7] GIARRATANO, J., RILEY, G., *Expert Systems – Principles and Programming*, 4 ed., Canada, Thomson Learning, 2005.
- [8] SOUTO, K., *Sistema Especialista com Lógica Nebulosa para Cálculo em Tempo Real de Indicadores de Desempenho e Segurança na Monitoração de Usinas Nucleares*. Tese de D. Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2005.
- [9] RUSSEL, S., NORVIG, P., *Inteligência Artificial*, 2 ed., Rio de Janeiro, Elsevier, 2004.

- [10] FITTING, M., “Kleene’s Logic, Generalized”, *Journal of Logic e Computation*, v.1, pp. 797-810, 1992.
- [11] SLADE, S., *Object-Oriented Common Lisp*, 1 ed., New Jersey, Prentice Hall, 1997.
- [12] GRAHAM, P., *ANSI Common Lisp*, 1 ed., New Jersey, Prentice Hall, 1996.
- [13] SEIBEL, P., *Practical Common Lisp*, 1 ed., Berkeley, Apress, 2005.
- [14] BUCHANAN, B., SHORTLIFFE, E., 1 ed., Addison-Wesley, 1984.
- [15] ELETRONUCLEAR, “Identificação de Acidentes”, *Manual de Operação da Usina de Angra 2*, parte 3, capítulo 1.3., rev. 9, Rio de Janeiro, 2010.
- [16] ELETRONUCLEAR, “Conceito das Tarefas do Operador”, *Manual de Operação da Usina de Angra 2*, parte 3, capítulo 1.1., rev. 0, Rio de Janeiro, 2001.
- [17] ELETRONUCLEAR, *Final Safety Analysis Report – FSAR*, rev. 10, Rio de Janeiro, 2007.
- [18] ELETRONUCLEAR, “Acidente com Perda de Refrigerante”, *Curso de Formação de Operadores Licenciados de Angra 2*, rev. 02, Rio de Janeiro, 2004.
- [19] ELETRONUCLEAR, “Acidente de Perda de Refrigerante com os Critérios de Refrigeração de Emergência Atingidos”, *Manual de Operação da Usina de Angra 2*, parte 3, capítulo 3.2., rev. 11, Rio de Janeiro, 2011.
- [20] ELETRONUCLEAR, “Acidente com Ruptura de Tubo de Gerador de Vapor”, *Curso de Formação de Operadores Licenciados de Angra 2*, rev. 01, Rio de Janeiro, 2004.
- [21] NICOLAU, A., *Computação Quântica e Inteligência de Enxames Aplicados na Identificação de Acidentes de uma Usina Nuclear PWR*. Dissertação de M. Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2010.

- [22] NELSON, W., “Reactor: An Expert System for Diagnosis and Treatment of Nuclear Reactor Accidents”. In: *Proceedings of Second National Conference on Artificial Intelligence*, pp. 296-301, Pittsburgh, Aug 1982.
- [23] GUO, Z. e UHRIG, R., “Accident Scenario Diagnostics with Neural Networks”. In: *Proceedings of 8th Power Plant Dynamics Control and Testing Symposium*, Knoxville, May 1992.
- [24] OHGA, Y. e SEKI, H., “Abnormal Event Identification in Nuclear Power Plants Using a Neural Network and Knowledge Processing”, *Nuclear Technology*, vol. 101, n. 2, pp. 159-167, 1993.
- [25] BARTAL, Y., LIN, J., UHRIG, R., “Nuclear Power Plant Transient Diagnosis Using Artificial Neural Networks That Allow ‘Don’t Know’ Classifications”, *Nuclear Technology*, vol. 110, n. 3, pp. 436-449, 1995.
- [26] CHANG, S., KANG, K., SHOI, S., *et al.*, “Development of the On-line Operator Aid System OASYS Using a Rule-Based Expert System and Fuzzy Logic for Nuclear Power Plants” *Nuclear Technology*, vol. 112, n. 2, pp. 266-294, 1995.
- [27] PEREIRA, C.M.N.A., SCHIRRU, R., MARTINEZ, A.S., “Learning an Optimized Classification System from a Data Base of Time Series Patterns Using Genetic Algorithm”, *Transactions on Information and Communication Technologies*, vol. 19, pp. 21-34, 1998.
- [28] ALMEIDA, J. C. S., *Método de Identificação de Transientes com Abordagem Possibilística, Otimizado por Algoritmo Genético*. Dissertação de M. Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2001.
- [29] MOL, A. C., MARTINEZ, A., SCHIRRU, R., “A Neural Model for Transient Identification in Dynamic Processes with ‘Don’t Know’ Response”, *Annals of Nuclear Energy*, vol. 30, pp. 1365-1381, 2003.

[30] MO, K., LEE, S. J., SEONG, P. H., “A Dynamic Neural Network Aggregation Model for Transient Diagnosis in Nuclear Power Plants”, *Progress in Nuclear Energy*, vol. 49, pp. 262-272, 2007.