



Universidade Federal
de Campina Grande
Mestrado Profissional em Sistemas de Energia Elétrica

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA
GRANDE**
CENTRO DE ENGENHARIA ELETRICA E INFORMATICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
ELÉTRICA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**MODELAGEM DO SISTEMA DE PROTEÇÃO E
CONTROLE DE UMA USINA HIDROELÉTRICA
PARA DIAGNOSTICO DE FALTA**

Marcos Antônio dos Santos Caetano

Marcos Antônio dos Santos Caetano

MODELAGEM DO SISTEMA DE PROTEÇÃO E CONTROLE DE UMA USINA HIDROELÉTRICA PARA DIAGNOSTICO DE FALTA

Dissertação de Mestrado apresentada à
Coordenação de Pós Graduação em Engenharia
Elétrica da Universidade Federal de Campina
Grande, em cumprimento às exigências para
obtenção do Grau de Mestre em Sistema de
Energia Elétrica

Área de Concentração: Processamento de Energia

ORIENTADORA: PROFA. PH.D. Maria de Fátima Queiroz Vieira
CO-ORIENTADOR: PROF. DR. Benemar Alencar de Souza

Campina Grande - PB

Agosto/2014



FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCCG

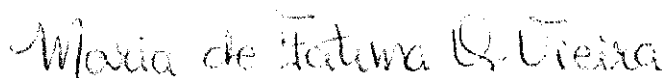
- C128m Caetano, Marcos Antônio dos Santos.
Modelagem do sistema de proteção e controle de uma usina hidroelétrica para diagnóstico de falta / Marcos Antônio dos Santos Caetano. – Campina Grande, 2014.
67 f. : il. color.
- Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Engenharia Elétrica e Informática, 2014.
- "Orientação: Prof.^a Dr.^a Maria de Fátima Queiroz Vieira, Prof. Dr. Benemar Alencar de Souza".
- Referências.
1. Usina Hidroelétrica. 2. Redes de Petri. 3. Sistema de Diagnóstico de Falta. 4. Recomposição do Sistema de Geração. I. Vieira, Maria de Fátima Queiroz. II. Souza, Benemar Alencar de. III. Título.

CDU 621.311.21(043)

**"MODELAGEM EM REDES DE PETRI DO SISTEMA DE PROTEÇÃO E CONTROLE DE
UMA USINA HIDROELÉTRICA PARA APOIAR O DIAGNÓSTICO DE FALTA"**

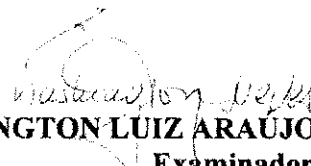
MARCOS ANTÔNIO DOS SANTOS CAETANO

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 31/10/2014


MARIA DE FÁTIMA QUEIROZ VIEIRA, Ph.D., UFCG
Orientador(a)


BENEMAR ALENCAR DE SOUZA, D.Sc., UFCG
Orientador(a)


NUBIA SILVA DANTAS BRITO, D.Sc., UFCG
Examinador(a)


WASHINGTON LUIZ ARAÚJO NEVES, Ph.D., UFCG
Examinador(a)

CAMPINA GRANDE - PB

"Os que se encantam com a prática sem a ciência são como os timoneiros que entram no navio sem timão nem bússola, nunca tendo certeza do seu destino." (Leonardo da Vinci)

AGRADECIMENTOS

Aos professores Fátima Vieira e Benemar Souza pela a orientação, incentivo e pelo o exemplo de simplicidade e dedicação ao trabalho. A minha esposa Nágela pela a paciência e compreensão nos momentos difíceis. Aos meus filhos, Sofia de sete anos e Davi de um ano e seis meses, que mesmo sem entenderem meu deram forças para continuar nessa jornada de conhecimento. A todos que de uma maneira ou de outra contribuíram para o meu êxito.

RESUMO

O uso do formalismo de rede de Petri na modelagem dos sistemas de proteção e controle de uma Usina Hidroelétrica é proposto. O objetivo foi implantar um sistema de diagnóstico de falta em uma Usina visando apoiar o estudo de faltas e apoiar operadores quando da tomada de decisão a qual passa a ser dar com base em um diagnóstico mais preciso sobre a causa raiz do desligamento da unidade geradora. O estudo se fundamentou na análise das proteções do sistema, na análise do histórico de faltas do sistema contido nos relatórios de ocorrências e no registro histórico do sistema supervisorio. Com o uso do aplicativo PIPE ("Plataform Independent Petri Net Editor V4.2.1") foi possível modelar em redes de Petri as principais proteções da usina e verificar a diminuição do número de alarmes gerado numa ocorrência com desligamento da unidade geradora, que chega a mais de 300 eventos para 5 eventos em uma janela de análise da ocorrência que é de aproximadamente 5 minuto considerando o tempo do disparo da proteção até a parada total da unidade. A abordagem usando rede de Petri proposto está limitada em analisar as ocorrências causadas pela o disparo das proteções elétricas.

Palavras-chave: Redes de Petri, Sistema de diagnóstico de falta, Usina Hidroelétrica, recomposição do sistema de geração

ABSTRACT

The use of the formalism of Petri nets in modeling the protection and control systems of a Hydroelectric Power. The objective is to implement a system of fault diagnosis in a power plant to support the study of faults and provide an accurate and objective diagnosis of the root cause of the shutdown of the generating unit, to support operators when making any decision. The study was based on analysis of system protections, the historical analysis of system faults contained in occurrence reports and historical record of the supervisory system. Using the PIPE Application ("Platform Independent Petri Net Editor v4.2.1") was possible to model Petri nets the main protections of the plant and verify the reduction of the number of alarms generated in occurrence with shutdown of the generating unit, which reaches more than 300 events to 5 events in an analysis window the event which is approximately five minutes considering the protection tripping time to complete stoppage of the unit. The proposed approach using Petri net is limited in analyzing the events caused by the firing of electrical protections.

Keywords: Petri net, fault diagnosis system, Hydroelectric Power.

CONTEÚDO

LISTA DE FIGURAS	viii
LISTA DE TABELAS	ix
LISTA DE NOMENCLATURAS E SÍMBOLOS	x
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Contexto	1
1.2 Motivação	1
1.3 Objetivos	2
1.4 Metodologia de Desenvolvimento do Trabalho	2
1.5 Organização do Trabalho	3
2 ABORDAGENS PARA O DIAGNÓSTICO DE FALTAS E IDENTIFICAÇÃO DA CAUSA RAIZ	4
2.1 Abordagens de Inteligência Artificial	4
2.1.1 Sistemas Especialistas	4
2.1.2 Técnicas baseadas na correlação de eventos	5
2.2 Lógica Fuzzy	6
2.3 Redes de Petri	8
2.3.1 Apresentação informal da Rede de Petri	9
2.3.2 Estrutura da Rede de Petri	9
2.3.3 Modelo simples de rede de Petri para o diagnóstico de falta em Usina Hidroelétrica	11
2.3.4 Equação fundamental da Rede de Petri	12
2.4 Considerações Finais	15
3 SISTEMA DE PROTEÇÃO DA UHE BOA ESPERANÇA	17
3.1 Usina Hidroelétrica Boa Esperança	17

3.2 Sistema de proteção da UHE Boa Esperança	18
3.2.1 Gerador e Turbina	19
3.2.2 Transformador elevador	22
3.2.3 Mancais	22
3.2.4 Sistema de Regulação de tensão e excitação	23
3.2.5 Sistema de Regulação de velocidade	23
3.3 Filosofia de proteção da unidade geradora	24
3.3.1 Parada da unidade geradora	25
3.4 Considerações Finais	27
4 MODELAGEM EM REDE DE PETRI DAS PROTEÇÕES ELÉTRICAS DA UNIDADE GERADORA	28
4.1 Estrutura do sistema de diagnóstico de Usina hidroelétrica SDF-UHE	28
4.2 Processo de diagnóstico	29
4.2.1 Camada Filtro	29
4.2.2 Camada Vetor	31
4.2.3 Camada Diagnóstico	32
4.2.4 Camada Interface	32
4.3 Modelagem em rede de Petri da proteção de um gerador	32
4.3.1 Proteções do gerador consideradas no diagnóstico de falta	32
4.3.2 Modelo em rede Petri das proteções do gerador	33
4.3.3 Procedimento de diagnóstico	36
4.3.4 Exemplo de Análise do diagnóstico	38
4.4 Estudo de Caso 1	47
4.5 Considerações Finais	51
5 CONCLUSÕES	52
5.1 Trabalhos Futuros	53
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	54

LISTA DE FIGURAS

2.1	Unidade de geração.	7
2.2	Diagrama sagital de uma unidade geradora.	7
2.3	Fluxograma falta fuzzy.	8
2.4	modelo simples em RP do sistema de proteção (Grafo)	12
2.5	Marcação inicial	13
2.6	Marcação transitória	14
2.7	Marcação final	14
2.8	Unidade geração 1 da Central High Dam	16
2.9	Modelo em rede de Petri da unidade 1 da Central High Dam	16
2.10	Matriz de Incidência	16
3.1	UHE Boa Esperança e Subestação associada	19
3.2	Diagrama Unifilar do Gerador e Transformador com o relé de proteção.	20
4.1	Estrutura em camada do SDF-UHE	29
4.2	Descrição dos campos do tag, exemplo 1	30
4.3	Descrição dos campos do tag, exemplo 2	30
4.4	Tela de eventos gerais da UHE Boa Esperança	31
4.5	- Diagrama de bloco do Vão C da UHE Boa Esperança	34
4.6	Modelo em rede de Petri das proteções do gerador da UHE Boa Esperança	35
4.7	Modelo em rede de Petri das proteções do gerador e transformador da UHE Boa Esperança	36
4.8	Fluxograma do algoritmo para o diagnóstico	37
4.9	Marcação inicial da rede de Petri	39
4.10	Marcação da RP após o primeiro disparo (M1)	43
4.11	Marcação da RP após o segundo disparo (M2)	45
4.12	Marcação final da RP (M3)	47
4.13	Marcação Inicial da RP para o caso 1	49

LISTA DE TABELAS

2.1	Exemplo de inferência clássica	5
3.1	Matriz de TRIP (disparo) de relés	26
3.2	Matriz de relés de bloqueio 86	27
4.1	Campos da tabela de eventos	30
4.2	Diagnóstico de ocorrência	46
4.3	Eventos do caso 1 extraído do SCADA	48

LISTA DE NOMENCLATURAS E SÍMBOLOS

IDE – Integrated Development Environment

SCADA – Supervisory Control and Data Acquisition

UC – Unidade de controle

UHE – Usina Hidroelétrica

CHESF – Companhia Hidroelétrica do São Francisco

RV – Regulador de Velocidade

SDF-UHE – Sistema de Diagnóstico de Falta de Usina Hidroelétrica

1 | INTRODUÇÃO

1.1 Contexto

A crescente expansão da geração de energia e a modernização das usinas hidroelétricas, popularizou os sistemas de aquisição, controle e supervisão de dados denominados sistemas *SCADA* (*Supervisory Control and Data Acquisition*); assim como as unidades de controle (UC); os reguladores digitais de velocidade e tensão e, os relés digitais multifunções, agregando mais eficiência e segurança na operação das usinas hidroelétricas.

Quando ocorre um desligamento intempestivo de uma unidade geradora numa instalação, uma avalanche de alarmes é apresentada pelo supervisório, na sala de comando da usina para avaliação do operador. Esse volume de informação dificulta a tomada de decisão do operador, expondo-o a possíveis interpretações e decisões errôneas, atrasando o retorno da unidade geradora ao sistema elétrico.

1.2 Motivação

A crescente complexidade dos sistemas de controle e proteção das usinas hidroelétricas (UHE) exige cada vez mais recursos materiais e humanos para sua operação, gerenciamento, manutenção. Diante dos novos desafios de melhoria da confiabilidade e da continuidade do serviço de geração de energia e da tendência de utilização de sistemas computacionais na supervisão, controle e proteção da UHE. Considerando que estes sistemas tendem a gerar uma grande quantidade de informação que precisam ser analisadas pelo o operador para identificar e localizar a falta no momento de uma ocorrência. Torna-se necessário a

criação de ferramenta que auxilie o operador e mantenedor de usina hidroelétrica na análise de ocorrência com o objetivo de minimizar o tempo de retorno da unidade geradora para o sistema com segurança.

1.3 Objetivos

Neste sentido, estamos propondo nesse trabalho uma abordagem usando rede de Petri [1] para modelar o sistema de proteção e controle de UHE que possa ser utilizado em um sistema de diagnóstico de falta em usina (SDF-UHE) visando oferecer um diagnóstico rápido, preciso e sucinto da falta auxiliando a tomada de decisão do operador. Como resultado tem-se uma instalação sujeita a menores períodos de parada, trazendo benefícios aos índices de disponibilidades, evitando a perda de faturamento e melhorando a qualidade de serviços. A metodologia baseia-se na proposta de [2] que consiste em dividir uma central de geração de energia em áreas de diagnóstico: unidade geradora, barramento, transformador de serviço auxiliar e transformador elevador. Essas áreas são modeladas em rede de Petri e utilizadas para estimar a localização da falta a partir da informação da atuação dos relés de proteção e de disjuntores.

1.4 Metodologia de Desenvolvimento do Trabalho

Para a execução deste trabalho foi adotada a seguinte metodologia:

- Estudar o sistema de proteção e controle da UHE Boa Esperança;
- Utilizar o aplicativo PIPE ("Plataform Independent Petri net Editor V4.2.1") para construir, simular e analisar o modelo de proteção proposto neste trabalho;
- Coletar dados do sistema SCADA da UHE Boa Esperança, pertencente ao parque gerador da CHESF (Companhia Hidroelétrica do São Francisco), para validar o modelo proposto;
- Realizar um estudo de caso, utilizando o histórico de ocorrências da UHE Boa Esperança.

1.5 Organização do Trabalho

No Capítulo 2, é apresentada uma breve revisão bibliográfica, são introduzidos os conceitos básicos de rede de Petri e o problema de identificação da causa raiz de falhas de componentes de usina a partir da análise do sistema de proteção e do histórico de falhas. No Capítulo 3 é apresentado o sistema de proteção e controle da UHE Boa Esperança. No capítulo 4 é apresentado o modelo do SDF-UHE proposto e um estudo de caso, realizado com o propósito de validar o modelo proposto. No Capítulo 5 são discutidos os resultados obtidos, seu alcance e apresentadas propostas de trabalhos futuros.

2

ABORDAGENS PARA O DIAGNÓSTICO DE FALTAS E IDENTIFICAÇÃO DA CAUSA RAIZ

Neste capítulo é apresentada uma revisão bibliográfica sobre o tema diagnóstico de falta. Na seção 2.1 é apresentada uma abordagem usando sistema especialista. Na seção 2.2 é apresentada uma abordagem usando lógica fuzzy. Na seção 2.3 apresentada uma abordagem usando rede de Petri.

2.1 Abordagens de Inteligência Artificial

O desenvolvimento de sistemas para o diagnóstico de faltas é um tema frequentemente abordado em pesquisas.

2.1.1 Sistemas Especialistas

A maioria dos esforços se concentra na aplicação de Sistemas Especialistas, a exemplo da pesquisa de [3]. A abordagem baseada Sistemas Especialistas, apesar de oferecer soluções para o diagnóstico de faltas, são de difícil implantação. O processo de aquisição de conhecimento e a revisão periódica (manutenção) da base conhecimento é onerosa, envolvendo uma grande quantidade de dados.

2.1.2 Técnicas baseadas na correlação de eventos

Em [3] é proposta uma ferramenta de tratamento de evento em rede elétrica usando técnicas de correlação de eventos. A correlação de eventos é uma tecnologia amplamente aceita e foi principalmente usada na pesquisa de falhas em redes de computadores e na análise da causa raiz. Existem vários tipos de correlação de eventos. De acordo com as operações realizadas sobre os eventos estas podem ser classificadas em: Compressão, Supressão Seletivas, Filtragem, etc.

Apesar das técnicas de correlação de eventos serem mais difundidas para análise de redes de computadores e de telecomunicação não existe nenhum impedimento em usá-las em rede de energia elétrica.

Dentre as técnicas mais empregadas de acordo com a literatura consultada, há as técnicas de raciocínio baseado em regras e raciocínio baseado em modelos.

O Raciocínio Baseado em Regras consiste de três elementos básicos: memória, base de conhecimento e mecanismo de inferência. A memória armazena fatos. A base de conhecimento contém o conjunto de regras que representa o conhecimento sobre quais fatos deve ser feita uma inferência e quais ações devem ser aplicadas sobre eles. O mecanismo de inferência é o algoritmo de raciocínio que verifica a memória e a base de conhecimento para confirmar se alguma correlação pode ser feita.

O algoritmo pode ser associado à inferência clássica, como ilustrado na tabela 2.1.

Tabela 2.1: Exemplo de inferência clássica

<p><i>A - um fato na memória</i></p> <p><i>Se A então B - uma regra na base de conhecimento</i></p> <p><i>Portanto, B - uma inferência feita pelo mecanismo de inferência.</i></p>
--

Como ilustrado no exemplo, o fato A é detectado na memória, a regra que utiliza o fato A como condição é acionada e, realiza a chamada da ação B. A grande vantagem da utilização dessa técnica é que as regras são intuitivas. Por outro lado, a grande desvantagem é a dificuldade de definir um conjunto de regras que expresse todas as situações possíveis da rede analisada, que, no caso do setor de energia, podemos considera a rede elétrica, além do grandes número de regras, o que dificulta a manutenção.

O Raciocínio Baseado em Modelos representa cada componente do sistema como um modelo que representa uma entidade física ou lógica. Uma descrição de um modelo inclui três categorias de informação:

- Atributo: a localização do modelo na rede pode ser considerada como um atributo;
- Relação com outro modelo: o modelo A está conectado em B e;
- Comportamento: informação do estado do modelo, isto é, se está ativo pode ser considerado como o comportamento desse modelo.

A vantagem da utilização dessa técnica é que o modelo usado para uma aplicação pode ser utilizado em outra aplicação o que facilita também a atualização na topologia da rede elétrica.

2.2 Lógica Fuzzy

Por outro lado, também são usadas outras técnicas de inteligência artificial na localização e diagnóstico de faltas em subestações e centrais de geração elétrica, dentre as quais se destaca a lógica fuzzy.

No trabalho [4] é proposto um método de diagnóstico de falta em central de geração de energia elétrica baseado em lógica fuzzy. Este método consiste em utilizar informações sobre relés de proteção e disjuntores para construir diagramas sagitais¹. Estes diagramas representam as relações fuzzy entre centrais elétricas, subestações e linhas transmissão. Com esse método é possível fazer o diagnóstico de áreas da subestação em falta e identificar problemas de mau funcionamento dos relés de proteção e disjuntores. A probabilidade de uma área da subestação estar com defeito é dada pelo grau de inclusão ou adesão *fuzzy* das possíveis áreas com falta. São definidos três conjuntos *fuzzy*. Conjunto de áreas candidatas à falta: unidade geradora, transformadores de serviço, transformador elevador, barramento e linha; conjuntos de relés de proteção. Para os relés de proteção são consideradas apenas as proteções principais e de retaguarda dos principais equipamentos definidos como áreas propícias à falta, tais como: proteção diferencial da unidade geradora (U7M87M), proteção de sobrecorrente de neutro de transformador (T751NI), etc. e conjunto de disjuntores constituído pelos disjuntores (U7CB) responsáveis por isolar a área em falta. Depois de definidos os conjuntos fuzzy é criado um diagrama sagital modelando a área a ser monitorada.

Na figura 2.2 é apresentado o diagrama sagital de uma unidade geradora figura 2.1. O diagrama sagital representa a relação *fuzzy* binária entre os conjuntos *fuzzy* definidos acima.

¹É um diagrama para representar o produto cartesiano entre dois conjuntos não vazios que são normalmente conhecidos pelo Diagrama de Venn-Euler.

Cada um dos conjuntos é representado por nós no diagrama. Elementos do conjunto com grau de adesão diferente de zero são representados por linhas que ligam os respectivos nós. Essas linhas são rotuladas com o grau de adesão.

Figura 2.1: Unidade de geração.

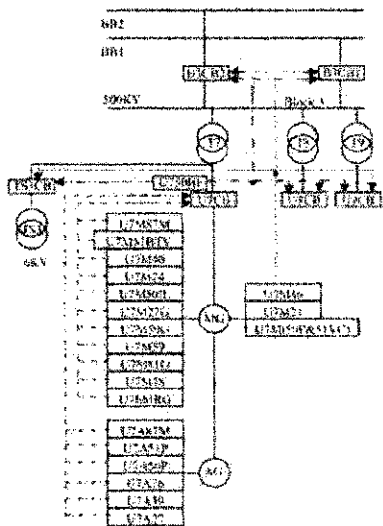
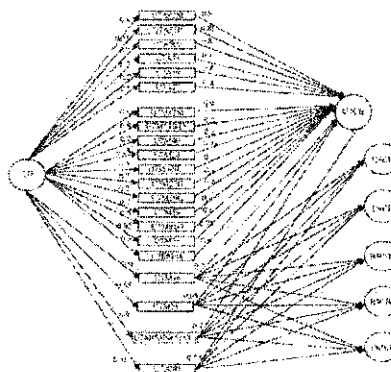


Figura 2.2: Diagrama sagital de uma unidade geradora.



Os valores das relações marcadas entre: o conjunto de áreas, os conjuntos de relés e os conjuntos de disjuntores, são determinados estatisticamente de acordo com as incertezas da operação e as prioridades de relés e disjuntores, quando ocorre uma falta.

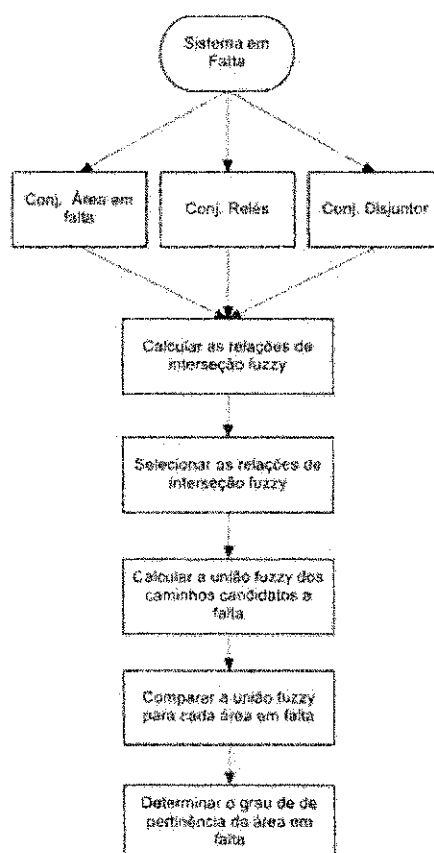
O processo de tomada de decisão para identificar o ponto de falta é descrito a seguir e representado na forma de fluxograma na figura 2.3:

1. processo de tomada de decisão para identificar o ponto de falta é descrito a seguir e representado na forma de fluxograma na Figura 2.3;
2. Ativar os conjuntos: área, relés e disjuntor, do sistema em falta;
3. A partir das informações da falta, para cada caminho de falta provável no diagrama sagital, calcular as relações de interseção *fuzzy*;
4. Selecionar as relações de interseções *fuzzy* dos caminhos candidatos à falta e calcular a união *fuzzy*;
5. Comparar a união *fuzzy* de cada candidato à área em falta, para determinar o grau de pertinência da área em falta.

Os sistemas de diagnóstico baseado em relações *fuzzy* são recomendados para o diagnóstico de falta quando há incerteza de informação. No caso do sistema elétrico, as

informações sobre os estados de relés e de disjuntores relevantes para o diagnóstico de falta podem apresentar erros devido à transmissão do sinal e erros de falha do equipamento (relé/disjuntor). Porém, estes sistemas são difíceis de serem construídos devido à dificuldade de encontrar a função de inclusão adequada e definir os graus de pertinência para os conjuntos *fuzzy* que serão usados para modelar o sistema em estudo.

Figura 2.3: Fluxograma falta fuzzy.



2.3 Redes de Petri

A teoria da rede de Petri foi desenvolvida pelo Alemão Carl Adam Petri em 1960 - 1962, com base no conceito de que as relações entre os componentes de um sistema, através de atividades assíncronas e paralelas, podem ser representadas por uma rede.

2.3.1 Apresentação informal da Rede de Petri

A rede de Petri pode ser definida informalmente usando três elementos básicos mostrados a seguir e o comportamento dinâmico da rede. [5].

- **Lugar** (representado por um círculo): pode ser interpretado com uma condição, um estado, um recurso, etc. Em geral todo lugar tem um predicado, por exemplo, máquina em falta, estado do disjuntor.
- **Transição** (representado por barra ou retângulo): é associada a um evento que ocorre no sistema, por exemplo, o disparo de uma proteção.
- **Ficha** (representado por um ponto num lugar): é um indicador significando que a condição associada ao lugar é verificada, por exemplo, uma ficha no lugar disjuntor indica que o disjuntor está aberto.

Comportamento dinâmico: O estado do sistema é dado pela a distribuição das fichas nos lugares da rede de Petri, cada lugar representando um estado parcial do sistema. A cada evento que ocorre no sistema, é associado a uma transição no modelo de rede de Petri. A ocorrência de um evento no sistema, que é a passagem de um estado atual ao próximo estado é modelado pelo o disparo da transição.

O disparo da transição consiste em dois passos:

- retirar as fichas dos lugares de entrada, indicando que esta condição não é mais verdadeira após a ocorrência do evento, e
- depositar ficha em cada lugar de saída, indicando que estas atividades estarão, após a ocorrência do evento, sendo executada.

2.3.2 Estrutura da Rede de Petri

A Rede de Petri pode ser representado na forma de grafo ou na forma matricial.

Grafo associado à notação matricial

Pode-se associar a uma rede de Petri um grafo com dois tipos de nós: lugares e transição e um arco que liga um lugar a uma transição. [5]. Assim:

- Um arco liga um lugar p a uma transição t se e somente se $Pre(p, t) \neq 0$;

- Um arco liga uma transição t a um lugar p se e somente se $Post(p, t) \neq 0$;
- Matriz de incidência anterior Pre de dimensão $n \times m$, onde o número de linhas é igual ao número de lugares e, o número de colunas é igual aos números de transições e os elementos $a_{ij} = Pre(p_i, t_j)$ indicam o peso do arco que liga o lugar de entrada p_i à transição t_j .
- A Matriz de incidência posterior $Post$ de dimensões $n \times m$ tem a mesma formação da matriz anterior com os elementos $b_{ij} = Post(p_i, t_j)$.

A Figura 2.4 exemplifica um grafo. Esta rede representa o sistema simplificado de proteção de uma unidade geradora.

Na forma matricial a Rede de Petri é uma quádrupla $R = \langle P, T, Pre, Post \rangle$. [5], onde:

- P é um conjunto finito de lugares de dimensão n ;
- T é um conjunto finito de transições de dimensão m ;
- $Pre : P \times T \rightarrow \mathbb{N}$ é a aplicação de entrada (lugares precedentes ou incidência anterior), com \mathbb{N} sendo o conjunto dos números naturais;
- $Post : P \times T \rightarrow \mathbb{N}$ é a aplicação de saída (lugares seguintes ou incidência posterior), com \mathbb{N} sendo o conjunto dos números naturais;

A quádrupla da figura 2.4 é definida por $R = (P, T, Pre, Post)$ com $P = \{A1, D1, R1, Rb1\}$, $T = \{T0, T1\}$, e os valores das aplicações de entrada e saída dados por

$$Pre(Rb1, T1) = 1 \quad (2.1)$$

$$Pre(R1, T0) = Pre(D1, T0) = 1 \quad (2.2)$$

$$Post(Rb1, T0) = 1 \quad (2.3)$$

$$Post(A1, T1) = 1 \quad (2.4)$$

Assim podemos montar as matrizes Pre e $Post$

$$Pre = \begin{pmatrix} T0 & T1 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{matrix} A1 \\ D1 \\ R1 \\ Rb1 \end{matrix} \quad (2.5)$$

$$Post = \begin{pmatrix} T0 & T1 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{matrix} A1 \\ D1 \\ R1 \\ Rb1 \end{matrix} \quad (2.6)$$

A partir das matrizes *Pre* e *Post* defini-se a matriz de incidência *C*

$$C = Post - Pre \quad (2.7)$$

$$C = \begin{pmatrix} T0 & T1 \\ 0 & 1 \\ -1 & 0 \\ -1 & 0 \\ 1 & -1 \end{pmatrix} \begin{matrix} A1 \\ D1 \\ R1 \\ Rb1 \end{matrix} \quad (2.8)$$

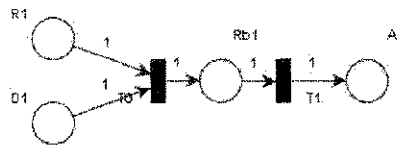
2.3.3 Modelo simples de rede de Petri para o diagnóstico de falta em Usina Hidroelétrica

O sistema de proteção da UHE será modelado utilizando o formalismo de rede de Petri a partir de informações do estado dos disjuntores e relés recebidas pelo sistema SCADA da sala de comando da usina.

Nesta rede, os lugares modelam informações sobre o estado de: disjuntores, relés de proteção, relés de bloqueio e áreas em falta, ou seja, ficha no lugar que representa o relé de proteção (*R1*) informa que o relé atuou, ficha no lugar que representa o disjuntor (*D1*) informa que o disjuntor estar aberto e ficha na área em falta (*A1*) indica que ocorreu uma falta nessa área. As transições *T0* e *T1* da rede de Petri da figura 2.4 descreve o evento ou ação.

A matriz C , equação 2.8, é a representação matricial da rede de Petri figura 2.4, essa matriz carrega a informação da topologia da rede, ou seja, está relacionado com a configuração do sistema de proteção da UHE. Ela é única para cada modelo.

Figura 2.4: modelo simples em RP do sistema de proteção (Grafo)



2.3.4 Equação fundamental da Rede de Petri

A equação fundamental, ou equação de estados, possibilita a análise da acessibilidade das marcações, bem como estabelecer o número de vezes que cada transição deve ser disparada para que se obtenha a referida marcação. Ela é responsável pela a dinâmica da rede na forma matricial. A Equação Fundamental das Redes de Petri é representada por:

$$M_1(p) = M_0(p) + C * S, \forall p \in P \quad (2.9)$$

onde S é o vetor característico, cujos componentes S_i pertence ao conjunto dos números naturais e representam o número de vezes que cada transição t_i foi disparada para se obter a marcação $M_1(p)$, a partir de $M_0(p)$; e C é a matriz de incidência.

Condição de alcançabilidade necessária: Supondo que a marcação final M_f é alcançável a partir de M_0 , dada a sequência de disparo $\{S_1, S_2, \dots, S_f\}$ [1]. Portanto a equação 2.9 pra $i=1,2,\dots,f$ é representada na equação 2.10.

$$M_f = M_0 + C * \sum_{i=1}^f S_i \quad (2.10)$$

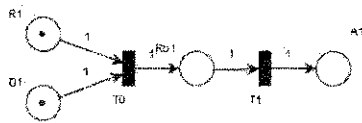
Usando o modelo simples da rede de Petri para diagnóstico de falta em UHE, figura 2.4, como exemplo para mostrar a dinâmica de rede.

A primeira marcação na rede representa a condição inicial do sistema para o diagnóstico. Fichas no lugar $D1$ significam que houve abertura do disjuntor no momento da ocorrência e, ficha no lugar $R1$, modela que o relé (ou a função do relé multifunção) percebeu a falta. Com as duas condições satisfeitas, atuação do relé e abertura do disjuntor, a transição $T0$ é

habilitada a disparar colocando ficha no lugar $Rb1$. Uma ficha no lugar $Rb1$, indica que o relé de bloqueio atuou parando a máquina. A transição $T1$ é então habilitada a disparar e coloca ficha no lugar $A1$. A existência de ficha nesse lugar indica que essa foi a área que sofreu a falta.

O modelo está representando a abertura do disjuntor $D1$, ficha no lugar $D1$, e a partida da proteção ou função de proteção do relé $R1$, ficha no lugar $R1$.

Figura 2.5: Marcação inicial



$$M_0(p) = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (2.11)$$

A ação da atuação da proteção e a partida do relé de bloqueio $Rb1$ é representado pelo o vetor S_1 , que representa o disparo da transição $T0$

$$S_1 = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \begin{matrix} T0 \\ T1 \end{matrix} \quad (2.12)$$

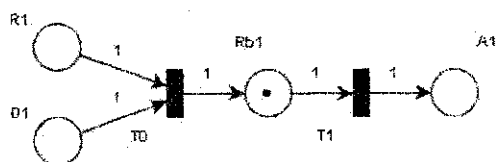
A próxima marcação M_1 é alcançada usando a equação 2.9.

$$M_1(p) = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \\ -1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (2.13)$$

$$M_1(p) = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ -1 \\ -1 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (2.14)$$

A marcação $M_1(p)$ é representada através de grafo na figura 2.6 e tem representação matricial na equação 2.15. Essa marcação representa atuação do relé de bloqueio com ficha no lugar $RB1$.

Figura 2.6: Marcação transitória



$$M_1(p) = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (2.15)$$

A ação da atuação do relé de bloqueio com disparo da transição $T1$ é representado pelo vetor S_2 .

$$S_2 = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} \begin{matrix} T0 \\ T1 \end{matrix} \quad (2.16)$$

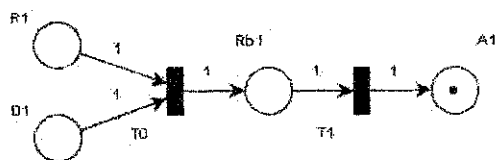
O número 1(um) na segunda linha do vetor S_2 representa o disparo da transição $T1$. A próxima marcação é M_2 que é alcançada usando a equação 2.10.

$$M_2(p) = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \\ -1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (2.17)$$

$$M_2(p) = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ -1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (2.18)$$

Estado final da rede de Petri com ficha no lugar A1, que representa a área em falta.

Figura 2.7: Marcação final



$$M_2(p) = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (2.19)$$

Em [2] é apresentado uma metodologia de diagnóstico de falta baseado em rede de Petri em central de geração de energia elétrica. A central é dividida em área de diagnósticos.

O sistema de proteção da unidade geradora da central de High Dam é dividido em três tipos de relés: Unidade de proteção (UP1) com as proteções principais a, unidade de proteção (UP2) que possui as proteções consideradas de retaguarda e a unidade *Breaker Failure*(UBF) de falha de disjuntor, disjuntor principal U1CB e os disjuntores de retaguarda responsável por isolar a unidade de geração 1 do sistema elétrico, ver Figura 2.8.

Na Figura 2.9 é apresentado o modelo em rede e Petri da unidade 1 da central High Dam do Egito com sua matriz de incidência, Figura 2.10 que é uma forma matricial de representar o grafo da rede de Petri.

O processo de diagnóstico de falta usando RP é realizado utilizando a informação final dos disjuntores e relés de proteção que é recebida do sistema SCADA. Essa informação é repassada para o modelo de diagnóstico de falta de rede de Petri, em seguida, é determinada a área defeituosa.

Neste trabalho é modelado quatro área de falta por unidade de geração da central de geração, o gerador, o transformador elevador, o transformador de serviço auxiliar e o barramento. Comparados o modelo de lógica *fuzzy* apresentado no item 2.1.4 e o modelo RP apresentado nessa seção a conclusão é que a RP é mais rápida e eficiente do que a lógica *fuzzy*.

2.4 Considerações Finais

Neste capítulo foi apresentado algumas abordagem existentes para diagnóstico de falta incluindo rede de Petri que será utilizada na abordagem que estamos propondo e mostraremos no Capítulo 4.

Figura 2.8: Unidade geração 1 da Central High Dam

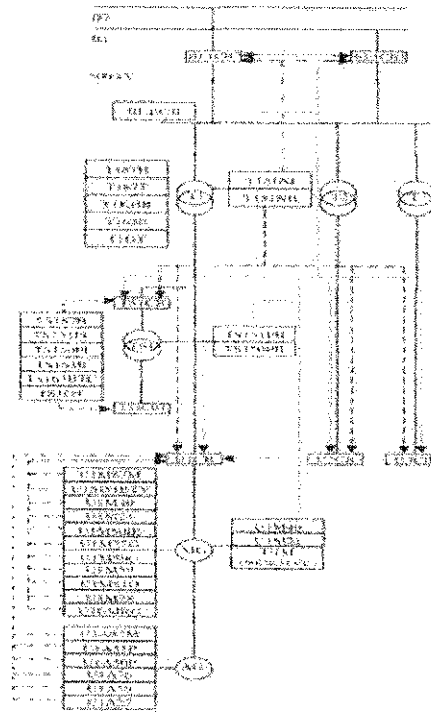


Figura 2.9: Modelo em rede de Petri da unidade 1 da Central High Dam

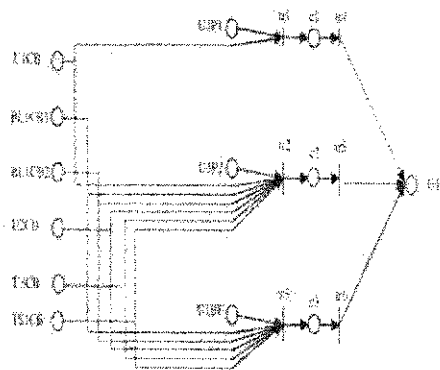


Figura 2.10: Matriz de Incidência

$$C = \begin{matrix} & tr1 & tr2 & tr3 & tr4 & tr5 & tr6 \\ \begin{matrix} U1P1 \\ U1CB \\ U1P2 \\ BL1CB1 \\ BL1CB2 \\ U2CB \\ U3CB \\ TS1CB \\ U1CBF \\ C1 \\ C2 \\ C3 \\ C1 \end{matrix} & \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & -1 \end{bmatrix} & \begin{matrix} U1P1 \\ U1CB \\ U1P2 \\ BL1CB1 \\ BL1CB2 \\ U2CB \\ U3CB \\ TS1CB \\ U1CBF \\ C1 \\ C2 \\ C3 \\ C1 \end{matrix} \end{matrix}$$

3

SISTEMA DE PROTEÇÃO DA UHE BOA ESPERANÇA

A Usina Hidroelétrica (UHE) Boa Esperança será usada como planta piloto para implantar a abordagem proposta neste trabalho. Essa usina faz parte do parque gerador da Companhia Hidroelétrica do São Francisco (CHESF) e está passando por uma modernização no sistema de proteção e controle que a qualifica para uso dessa técnica.

Na seção 3.1 será apresentado o diagrama unifilar desta usina e seus principais componentes.

Na seção 3.2 será apresentada a filosofia de proteção do gerador, transformador elevador e dos principais subsistemas da unidade geradora.

3.1 Usina Hidroelétrica Boa Esperança

As unidades geradoras da UHE Boa Esperança têm as seguintes características. Um gerador síncrono de eixo vertical; duas máquinas com potência instalada de 54MW (01G1 e 01G2) as quais alimentam os serviços auxiliares da usina através do transformador 13,8/0,38 kV, 1000 kVA e, duas unidade geradoras com 64MW (01G3 e 01G4) que também alimentam os serviços auxiliares; fator de potência 0,9; tensão de fase 13,8 kV e turbinas do tipo Francis; com velocidade nominal 120 RPM e potência de 75.000 HP.

O sistema utilizado para disponibilizar a energia gerada é composto por uma subestação elevadora composta por 03 transformadores de 70 MVA e 01 de 60 MVA, que elevam a tensão de 13,8 kV para 230 kV. A partir desse ponto é feita a conexão com o sistema de transmissão da CHESF através da Subestação de Boa Esperança (BES) 230 kV.

A subestação BES possui o arranjo do tipo disjuntor e meio ¹, quatro disjuntores de máquina (14G1, 14G2, 14G3 e 14G4) com suas respectivas chaves seccionadoras de isolamento do disjuntor (34Gs-4, 34Gs-5 e 34Gs-7) e, chaves de aterramento (34Gs-7). Os disjuntores de linha (14V1) e de transformador (14T5) também possuem chaves seccionadoras de isolamento e terra (34V1-4, 34V1-5, 34V1-7, 34T5-4, 34T5-5, 34T5-7). O disjuntor 14T5 interliga o setor de 230 kV ao setor de 69 kV da subestação. O vão é completado com os disjuntores de transferência (14D1, 14D2 e 14D3) e chaves seccionadoras (34Ds-1 e 34Ds-2) compartilhadas.

Na Figura 3.1 estão representados os principais componentes da usina e da subestação associada (BES), a qual é responsável pela conexão da usina com o sistema de transmissão é também onde estão instalados os disjuntores de proteção das unidades geradoras.

A abordagem proposta será aplicada a apenas um vão, composto pelos seguintes componentes: unidade geradora (01G3), transformador elevador (01T3) e os disjuntores 14G3 e 14D3, destacados na Figura 3.1 com um retângulo pontilhado. A seguir é detalhado o sistema de proteção da Usina.

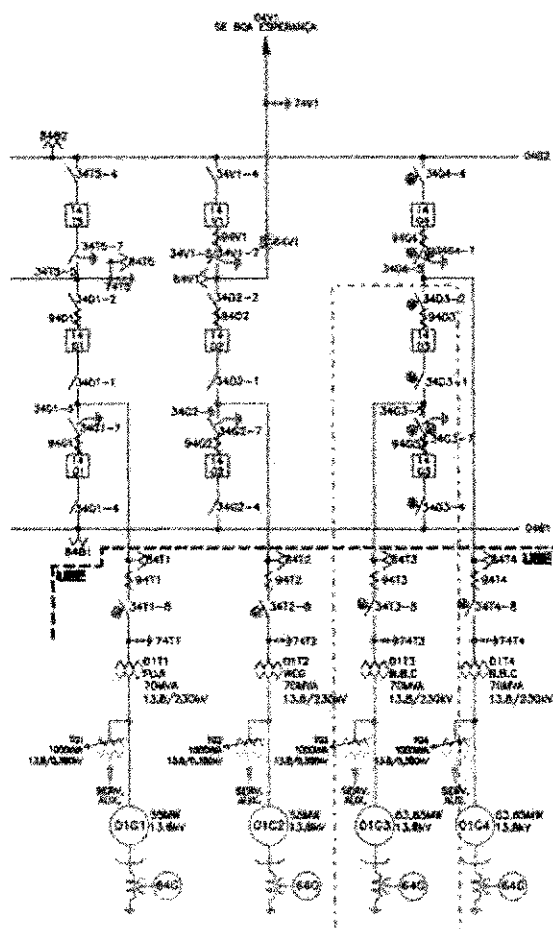
3.2 Sistema de proteção da UHE Boa Esperança

Para facilitar a modelagem, as faltas associadas à unidade geradora que serão tratados nesse trabalho, bem como os relés e dispositivos de proteção necessários, foram agrupados por equipamento. Este sistema está representado na Figura 3.2 e suas partes são descritas a seguir.

O sistema de proteção elétrica do gerador 01G3 e transformador elevador 01T3 é composto por dois painéis de proteção denominados de painel de proteção alternada (PA-01G3) e painel de proteção principal (PP-01G3) que são redundantes, destacados por linhas pontilhadas. No painel de proteção principal estão instalados os relés de proteção multifunção do gerador e transformador elevador, relé de proteção principal do gerador (RPPG) e Rele de proteção principal do transformador (RPPT) ambos da empresa *SIEMENS*. O sistema de excitação que está instalado no painel (RT-01G3) e o regulador de velocidade (RV-01G3) destacados por linhas pontilhada também está na Figura 3.2. A unidade de controle (UC-01G3) que não será discutido nesse trabalho é responsável pelo o controle

¹ O Arranjo de subestação com disjuntor e meio é caracterizado por apresentar três disjuntores para dois circuitos onde cada circuito está entre dois disjuntores e possui dois barramentos principais. A falha em um dos circuitos provocará uma abertura nos dois disjuntores e não interferirá em quaisquer outros circuitos. O terceiro disjuntor é considerado de transferência e servi a qualquer um dos dois circuitos o que garante a manutenção de qualquer disjuntor sem a necessidade da interrupção de nenhum dois circuitos.

Figura 3.1: UHE Boa Esperança e Subestação associada



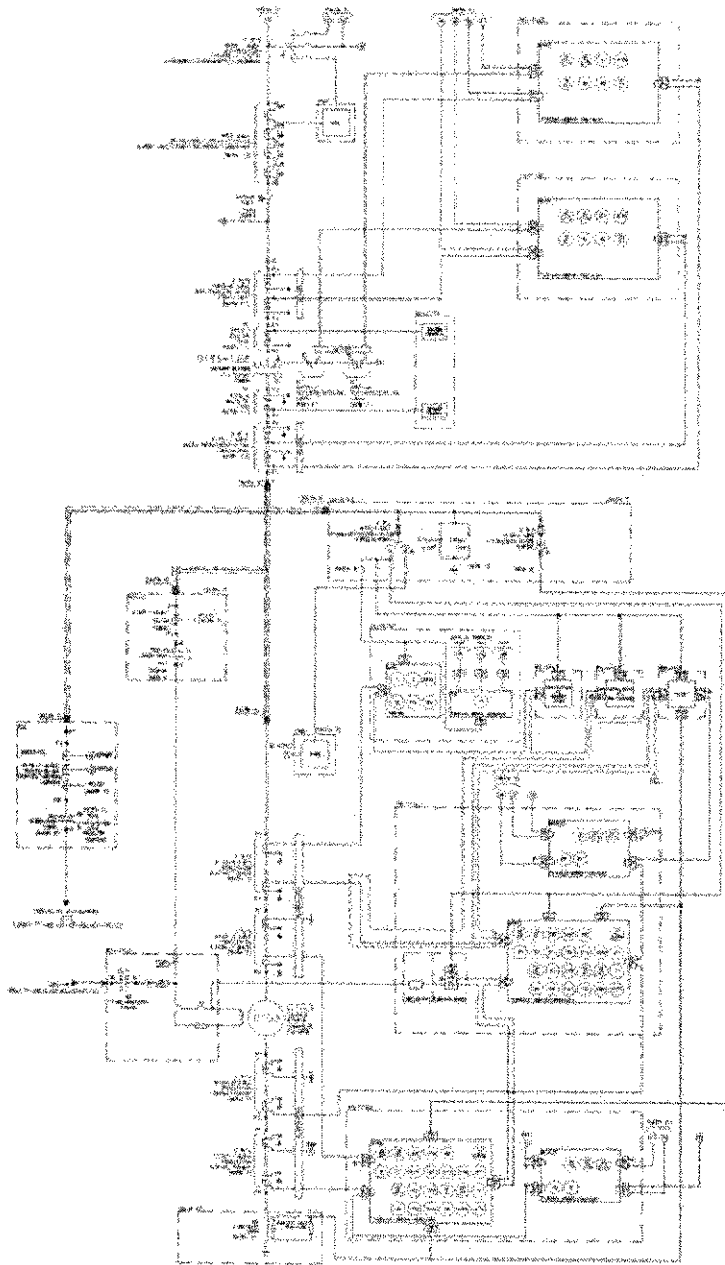
e supervisão da unidade geradora.

3.2.1 Gerador e Turbina

Estator

- Proteção Diferencial do Gerador (87G). A principal proteção do gerador. Os tipos de faltas monitoradas são: curto-circuito entre fase e/ou enrolamento aberto do estator.
- Proteção Contra Terra no Estator (64S-90%). Esta proteção detecta falta a terra nos enrolamentos do estator. O princípio utilizado baseia-se no deslocamento do neutro provocado por falta a terra e, chega a proteger até 95% do enrolamento do estator.
- Proteção Contra Terra no Estator (64S-100%). Esta proteção detecta falta a terra

Figura 3.2: Diagrama Unifilar do Gerador e Transformador com o relé de proteção.



nos enrolamentos do estator. O princípio utilizado baseia-se na medição do terceiro harmônico de tensão, o qual é diminuído no ponto de aterramento e elevado nos terminais do gerador, na condição de falta a terra. Protege de 90% a 100% do enrolamento do estator.

- Proteção Térmica dos Enrolamentos do Gerador (49). Proteção de sobrecarga do sistema que causa aquecimento no enrolamento do estator podendo trazer danos ao isolamento do estator.
- Proteção Contra Falhas Externas entre Fases (21). É uma proteção de distância utilizada como proteção de retaguarda para curto-circuito no gerador, principalmente para faltas entre fases.
- Proteção Contra Sobre-excitação (24). Esta proteção detecta condições de sobre-excitação em geradores. Ela deve operar quando a indução magnética ultrapassa o valor admissível da máquina. Considerando que a indução magnética (B) é proporcional à tensão (v) e inversamente proporcional à frequência (f), utiliza-se a relação v/f como grandeza representativa da indução.
- Proteção Contra Sobretensão no Gerador (59): Esta proteção é utilizada para proteger a máquina dos efeitos de tensão elevadas, normalmente causadas por falhas nos sistema de excitação, no regulador de tensão ou por rejeição de carga.

Rotor

As faltas envolvendo o rotor que iremos relacionar podem ocorrer no enrolamento dos polos e no núcleo.

- Proteção Contra Perda de Excitação (40). Esta proteção detecta falha no enrolamento de campo que provoque perda de excitação, a qual pode causar danos ao gerador e ao sistema de potência. O gerador operará como motor de indução com uma grande circulação de corrente no rotor, trazendo danos para sua isolação.
- Proteção Contra Terra no Rotor - (64R). Esta proteção detecta falta à terra no rotor.
- Proteção Contra Corrente de Sequencia Negativa (46). A operação do gerador com corrente desequilibradas no estator, são causadas principalmente por faltas desequilibradas próximas à usina. Cargas desequilibradas ou fase aberta fazem com que a componente de sequência negativa induza uma corrente de dupla frequência no rotor podendo provocar sobreaquecimento no rotor e vibração no estator.

- **Proteção Contra Potência Inversa (32).** É usada para proteger a turbina. A potência inversa tende a motorizar o gerador², causando cavitação na turbina. Essa falha pode ocorrer devido a um baixo fluxo de água na turbina, no caso do gerador trabalhando como compensador síncrono; ou por falha no sistema do ar de rebaixamento. Este sistema é responsável por expulsar a água da turbina através de injeção de ar comprimido quando o gerador opera como compensador síncrono.

3.2.2 Transformador elevador

O sistema de proteção é constituído por relés numéricos multifunção, redundantes (de mesmo fabricante), instalados nos painéis de proteção das unidades geradoras, com as funções de proteção descritas a seguir:

- **Proteção Diferencial do Transformador (87TE).** Esta proteção detecta falta dentro de uma zona de proteção estabelecida pelo transformadores de corrente. Neste caso o transformador elevador está dentro da zona de proteção.
- **Proteção Diferencial de Terra Restrita do Transformador Elevador (87NTE):** Esta proteção detecta falta à terra, dentro dos enrolamento do transformador.

3.2.3 Mancais

Mancal é o equipamento responsável pela sustentação do conjunto girante da unidade geradora e por posicionar um elemento girante (rotor) da máquina com relação ao estator, parte estática. O arranjo de mancais da unidade geradora da UHE Boa Esperança é composto por um mancal combinado: mancal guia e escora, localizado na cruzeta inferior do gerador e, um mancal guia instalado junto à tampa da turbina.

Mancal combinado e mancal guia da turbina

O mancal combinado é constituído pelo mancal guia do gerador que é formado por um conjunto de segmentos recobertos com metal patente e pivotados por parafusos de ajuste para permitir regular a folga de cada segmento e permitir a formação do filme de óleo. O mancal escora é formado por um anel segmentado, apoiado sobre molas e, recoberto de metal patente. Ele tem a função de sustentar o conjunto girante formado pelo gerador e turbina.

²Motorizar o gerador é um termo usado para indicar que o gerador está recebendo potência ativa

- Proteção de temperatura do metal do mancal (38ME). Esta proteção detecta temperatura alta no metal do mancal, a qual pode danificar a estrutura do metal patente.

3.2.4 Sistema de Regulação de tensão e excitação

O sistema de excitação utilizado na UHE Boa esperança é do tipo estático, formado por ponte retificadora com tiristores, alimentado a partir do transformador de excitação ligado diretamente aos terminais do gerador. O sistema de excitação é composto pelos seguintes componentes:

- Regulador automático de tensão;
- Excitatriz.

Regulador Automático de Tensão

É o subsistema que compara a tensão da unidade com a tensão de referência escolhida. Mede o erro entre as tensões e emite um sinal para a excitatriz, de modo a anular esse erro.

- Proteção do Regulador automático de tensão: Esta proteção é usada para detectar falha na unidade de controle do regulador automático de tensão.

Excitatriz

É o subsistema que recebe o sinal de erro do Regulador Automático de Tensão e emite um sinal de saída para controlar a excitação do gerador. A excitatriz é responsável por suprir a corrente de campo solicitada pelo gerador. A excitatriz é alimentada pelo o transformador de excitação (TEX). Retifica a tensão através da ponte de tiristores e alimenta o circuito de campo do gerador.

3.2.5 Sistema de Regulação de velocidade

O sistema de regulação de velocidade da UHE Boa esperança é baseado em microprocessadores, com ação de controle efetuada numericamente. É constituído pelos seguintes subsistemas:

- Regulador de velocidade/potência;
- Unidade eletro-hidráulica.

Regulador de Velocidade

É o subsistema que compara a frequência da unidade com a frequência de referência, mede o erro entre estas frequências e emite um sinal para a unidade eletro-hidráulica, visando anular este erro.

- Proteção de falha grave no Regulador de velocidade: Esta proteção é usada para detectar falha na unidade de controle do regulador de velocidade.

Unidade eletro-hidráulica

É o subsistema que recebe o sinal do regulador de velocidade, amplifica, e emite um sinal hidráulico (vazão de óleo) para controlar o deslocamento do servomotor.

3.3 Filosofia de proteção da unidade geradora

O gerador (01G3) é protegido por dois relés multifunção idênticos: relé de proteção principal e relé de proteção alternada³ (RPPG-01G3) e (RPAG-01G3) os quais comandam o disjuntor de máquina (14G3) e o disjuntor de transferência (14D3). Devido ao arranjo de configuração da SE BES, o qual é disjuntor e meio, estes relés são responsáveis por isolar a unidade geradora do sistema e o disjuntor de campo (41G3), responsável pela desexcitação da unidade geradora.

O sistema de excitação é protegido pelas proteções internas do regulador de tensão e da excitação, os quais também comandam os disjuntores de máquina (14G3), de transferência (14D3) e de campo (41).

O sistema de regulação de velocidade é protegido pelas as proteções internas do regulador de velocidade e da central hidráulica as quais comandam os disjuntores de máquina, transferência, válvula de segurança do circuito hidráulico do servomotor, que é responsável por fechar hidráulicamente o distribuidor e a comporta de emergência que interrompe o fluxo de água na turbina.

Na Tabela 3.1 é apresentada a matriz resumida de *trip* de relés da UHE Boa Esperança, contendo as principais proteções. Com essa matriz é possível verificar a relação das proteções com os relés de bloqueios, Tabela 3.2.

³ A proteção principal é o esquema de proteção composto por um sistema de proteção unitária ou restrita e um sistema de proteção gradativa ou irrestrita. A proteção alternada é o esquema de proteção funcionalmente idêntico à proteção principal e completamente independente desta. Submódulo 2.6 do procedimento de rede do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS)

Essa matriz é essencial para a modelagem que será realizada neste trabalho, uma vez que, a estrutura de RP é baseado nas informações que constas nelas, ou seja, a partir da informação da proteção é possível identificar qual relé de bloqueio atuou caracterizando a forma de parar a unidade geradora que é definido a partir do tipo de falta, por exemplo, com a informação da atuação da proteção diferencial do gerador (87G), na tabela 3.1, essa proteção atua no relé de bloqueio 86E que estão agrupadas as proteções elétricas. Na tabela 3.2, podemos perceber atuação do relé 86E que define a parada da unidade, os disjuntores e principais equipamentos envolvidos. O relé 86E causa uma parada total com rejeição de carga, ou seja, nessas condições a parada é abrupta, abre-se o disjuntor principal com a máquina em plena carga. Correlacionando essas informações é possível definir a origem do problema que nesse exemplo podemos supor que foi uma falta elétrica no gerador, visto que, foi uma falta grave devido a parada abrupta, de origem elétrica devido a atuação do relé 86E e a atuação da proteção 87G que é responsável por monitorar falta elétrica no gerador.

3.3.1 Parada da unidade geradora

Os relés e dispositivos de proteção têm uma função de proteção bem definida para cada tipo de falta no equipamento protegido. Como cada tipo de falta submete o equipamento a um determinado grau de risco de dano, a atuação destes relés e dispositivos de proteção foram agrupados em relés de bloqueios (86) os definem a forma de parada específica para cada falta. Os comandos de parada de máquina com bloqueio de operação são efetuados através dos relés de bloqueio, conforme descrito a seguir.

- 86PR - parada parcial com rejeição de carga - máquina rodando em vazio sem excitação;
- 86E - parada de emergência elétrica - parada total com rejeição de carga;
- 86M - parada de emergência mecânica - parada total com rejeição de carga;
- 86MS - parada de emergência mecânica - parada total sem rejeição de carga e
- 86H - parada hidráulica - parada total com rejeição de carga e fechamento da comporta da tomada d'água.

O esquema de proteção da unidade geradora usa o relé de bloqueio (86) para comandar os equipamentos responsáveis pela parada da unidade geradora com rejeição de carga, sem rejeição de carga (parada da unidade com descarregamento de potência ativa pelo regulador de velocidade e potencia reativa pelo regulador de tensão) e com fechamento de comporta. A Tabela 3.2 mostra os tipos de parada e os principais equipamentos envolvidos.

Tabela 3.1: Matriz de TRIP (disparo) de relés

	86PN	86E	86MS	86M	86H
Sobretensão instantânea (59)	x				
Perda de excitação (40)	x				
Potencia reversa (32)	x				
Sobre excitação (24)	x				
Sequência Negativa (46)	x				
Diferencial do gerador (87G)		x			
Terra estator 90% (64S)		x			
Terra estator 100% (64S)		x			
Terra rotor (64R)		x			
Sobrecorrente no transformador de excitação (51)		x			
Falha no RT		x			
Proteção sist. Excitação		x			
Sobrecorrente crow bar		x			
Diferencial do transformador (87TE)		x			
Diferencial de terra rest. do transformador (87NTE)		x			
Proteções intrínsecas do transformador elevador		x			
Temperatura alta sapata MGT 2º grau (38MGT)			x		
Temperatura alta sapata ME 2º grau (38ME)			x		
Temperatura alta sapata MGG 2º grau (38MGG)			x		
Fechamento indevido da comporta (33)				x	
Atuação indevido dos freios				x	
Botão parada de emergência				x	
Baixa pressão no acumulador de óleo/N2 2º grau					x
Sobre velocidade 2º grau					x
Sobre velocidade mecânica					x
Falha no RV					x
Comporta de tomada d'água em deriva					x

Tabela 3.2: Matriz de relés de bloqueio 86

Relé de bloqueio	Função	Disjuntor		RT	RV parada	unid	comporta
		14G3	14D3				
86PR	parada parcial com rejeição de carga	x	x	x			
86E	parada total com rejeição de carga;	x	x	x		x	
86M	parada total com rejeição de carga;	x	x	x	x		
86MS	parada total sem rejeição de carga	x	x	x		x	
86H	parada total com rejeição de carga e fechamento da comporta da tomada d'água	x	x	x		x	x

3.4 Considerações Finais

Neste capítulo foi apresentada a estrutura geral da proteção da UHE Boa Esperança utilizada como referência para desenvolvimento deste trabalho. Foram englobados aspectos da estrutura do diagrama unifilar da UHE, bem como de controle e proteção dos principais subsistemas da usina.

4

MODELAGEM EM REDE DE PETRI DAS PROTEÇÕES ELÉTRICAS DA UNIDADE GERADORA

Neste capítulo é apresentado uma nova abordagem para a implementação de diagnóstico de faltas em usinas hidroelétrica (SDF-UHE) baseada em rede de Petri (RP) lugar transição e fundamenta-se nos modelos apresentados em [2] estendido a usina hidroelétrica. Os resultados alcançados são apresentados no capítulo 5.

4.1 Estrutura do sistema de diagnóstico de Usina hidroelétrica SDF-UHE

O SDF-UHE proposto está estruturado em forma de camada, onde cada camada tem uma função específica. A camada filtro busca os eventos do banco de dados do SCADA e extrai os eventos relevantes tais como: abertura de disjuntor e atuação dos relés de proteção e relés de bloqueio. A camada vetor transforma os eventos que chegam da camada filtro em um vetor marcação inicial que é executado pelo o modelo em RP na camada rede de Petri que fornecerá o diagnóstico. A camada interface é responsável por transformar o resultado da RP que está na forma matricial em um formato amigável para o operador. Ver Figura 4.1.

4.2 Processo de diagnóstico

4.2.1 Camada Filtro

O processo de diagnóstico de faltas na UHE inicia com a coleta de informações sobre os sistemas que compõe a UHE. Estas informações são obtidas do sistema SCADA da UHE, e são utilizadas na construção do modelo das proteções da usina.

Este estudo abordou a estrutura da base de dados da UHE Boa Esperança e as proteções da usina. Os dados foram obtidos do sistema SCADA e da base de dados *off-line* da UHE BE. As informações armazenadas na base de dados consistem de eventos gerados pelos sistemas que compõe a UHE. Os dados armazenados na base de dados consistem:

- estado dos disjuntores;
- atuação de relés de proteção;
- estado das moto bombas do sistema de regulação de velocidade;
- medições analógicas de temperatura,
- medições analógicas de velocidade da unidade geradora, as medições analógicas não são usadas pelo o SDF-UHE;

Passo 1 - extrai-se da base de dados do SCADA as informações necessárias para a marcação inicial da rede de Petri. A busca deve ser iniciada a partir do *timestamp* (data-hora) da informação de abertura do disjuntor de banco (disjuntor principal) que isola a unidade geradora do sistema.

Figura 4.1: Estrutura em camada do SDF-UHE

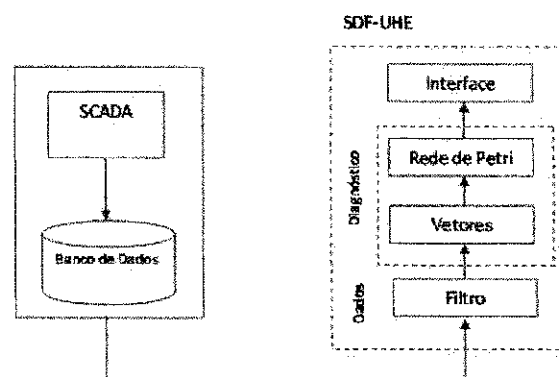


Tabela 4.1: Campos da tabela de eventos

Campo	Descrição
Entrada	Data, hora, minuto, segundo e milissegundo que ocorreu o evento
Tag	Código de identificação do evento
Descrição	Descrição do evento
Tipo de sinal	Define se é uma saída digital, um alarme de advertência, alarme de urgência, etc.
Valor	Informa se o evento está ativo (presente) ou inativo (ausente)
Unidade de controle	Informa a origem do evento, qual unidade de controle registrou o evento.
Área	Informa que equipamento gerou evento

Passo 2 - com a informação do *timestamp* da ocorrência, varrer a tabela adquirindo dados no intervalo dos 5 minutos anteriores à abertura do disjuntor, coletando informações relativas ao estado do relé 86 e das demais proteções elétricas.

O sistema SCADA da UHE Boa Esperança armazena em uma tabela de eventos as informações sobre todos os eventos gerados na usina, a exemplo da informação de abertura do disjuntor, do painel de iluminação da usina e informações de *TRIP* da unidade geradora. Os eventos são armazenados cronologicamente em intervalos de 1ms (eventos digitais).

Na Tabela 4.1 são apresentados os campos, da tabela de eventos, relevantes para este trabalho e, as respectivas descrições.

O sistema de diagnóstico proposto neste trabalho fará uma varredura na tabela de eventos do SCADA em busca de eventos relevantes para o diagnóstico e localização da falta. Para isso será utilizado o campo *tag* da tabela de eventos (ver Figura 4.4). Os valores deste campo trazem informações codificadas sobre o evento como apresentado nas Figuras 4.2 e 4.3.

Figura 4.2: Descrição dos campos do tag, exemplo 1

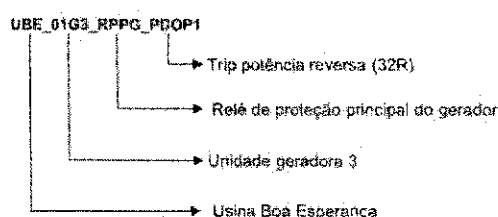


Figura 4.3: Descrição dos campos do tag, exemplo 2

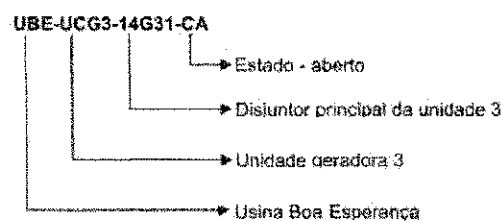


Figura 4.4: Tela de eventos gerais da UHE Boa Esperança



Durante uma ocorrência são armazenados na tabela de eventos gerais, todos os eventos gerados para todas as unidades.

A Figura 4.4 ilustra a tela de eventos com a ocorrência da atuação do relé 32, devido à potencia reversa. Como se pode verificar na figura, mesmo selecionando os tipos de sinais que devem ser exibidos (tais como sinais digitais, alarmes de advertência e alarmes urgentes) e; limitando a janela de tempo de análise da ocorrência, ainda há 314 eventos a serem analisados para localizar o alarme que gerou o *TRIP* e assim identificar a área da ocorrência.

4.2.2 Camada Vetor

Nesta camada é feita a marcação inicial, é criado o vetor $M0$ da RP usando as informações recebidas da camada filtro. A informação da ocorrência dos eventos de abertura de disjuntor e atuação dos relés de proteção são levadas em forma de marcação para os respectivos lugares da RP. Considerando que a camada filtro encontrou os eventos disjuntor ($D1$) no estado aberto e relé ($R1$) atuado na janela de análise então o vetor marcação inicial para o modelo da RP e mostrado nas Figura 2.9. A equação 2.11 é representação matricial da marcação $M0$ e o vetor característico S que indica que a transição $T0$ pode disparar é representado na equação 2.12.

4.2.3 Camada Diagnóstico

A camada diagnóstico é responsável por executar a RP, ou seja, é responsável pela a dinâmica, que na forma matricial pode ser observado na Equação 2.10. O resultado da execução da RP é a marcação final que indica a área em falta. Ver Figura 2.7 e a equação 2.19.

4.2.4 Camada Interface

Na camada interface ocorre a transformação do vetor Marcação final M_f em uma informação clara para o operador, no exemplo da Figura 2.7 a informação é falha na área A1.

4.3 Modelagem em rede de Petri da proteção de um gerador

4.3.1 Proteções do gerador consideradas no diagnóstico de falta

Para fins de validação, a estratégia para identificação da causa raiz, ou seja, a localização da falta será aplicada ao vão C, da unidade geradora 01G3, da UHE Boa Esperança.

Do ponto de vista da proteção, a unidade geradora é constituída de quatro áreas ou subsistemas de proteção, os quais serão modelados para apoiar o diagnóstico de falta. Os quatro subsistemas de proteção são: a proteção do gerador (gerador e turbina); a proteção do sistema de regulação de velocidade; a proteção do sistema de regulação de tensão e a proteção mecânica do mancal.

Na Figura 4.5 é apresentado o diagrama de blocos que ilustra os diversos sistemas de proteção que compõem a unidade geradora. O sistema de proteção elétrica é composto por:

- relés de proteção multifunção principal e alternado do gerador, RPPG e RPAG, estes relés são idênticos;
- relés de proteção multifunção principal e alternada do transformador elevador, os quais também são idênticos,
- disjuntor principal 14G3 e o disjuntor principal e de transferência 14D3, que também serve a unidade 01G4;

- sistema de excitação composto pelo o disjuntor de campo eletromagnético 41G3, transformador de excitação TEX-3, ponte de tiristores e o regulador de tensão digital;
- sistema de regulação de velocidade, composto pelo o regulador de velocidade e a unidade hidráulica que não está representada no diagrama;
- fazem parte também do sistema de proteção, os relés de bloqueio responsáveis por parar e bloquear a unidade geradora com segurança e, a comporta de emergência cuja função é cortar o fluxo de água, a qual não está representada nesse diagrama de blocos.

4.3.2 Modelo em rede Petri das proteções do gerador

Nesta subseção será apresentado o modelo em rede de Petri das proteções do gerador descrito na seção anterior, Figura 4.6. Este modelo também é válido para as demais áreas de proteção, conforme pode ser visto na Figura 4.7 que modela a proteção do transformador elevador junto com a proteção de gerador.

O modelo é simulado no programa aplicativo PIPE para a modelagem, simulação e análise de Redes de Petri (RP). O aplicativo PIPE (Plataform Independent Petri net Editor) foi inicialmente criado como um projeto de um grupo de alunos de pós-graduação do Departamento de Computação do *Imperial College London*, em 2003. O objetivo era criar um aplicativo para edição e análise de RPs. [13]

Este modelo possui os lugares P_{14G3} , P_{14D3} , os quais representam os disjuntores principais e o lugar P_{41G3} que representa o disjuntor de campo eletromagnético. Fichas nesses lugares informam que esses disjuntores atuaram, ou seja, abriram numa condição de falta.

Os lugares P_{46} , P_{59} , P_{40} , P_{32} , P_{24} , P_{87G} , P_{64R} , $P_{64S90\%}$ e $64S100\%$, representam as funções de proteção do relé e estão codificados conforme norma ANSI [6]. Fichas nesses lugares indicam que a função de proteção representada pelo lugar atuou para eliminar a falta.

Os lugares P_{86PR} e P_{86E} representam os relés de bloqueio, os quais além de bloquear também têm a função de parar a unidade geradora com segurança. Ficha nesse lugar representa que o relé de bloqueio atuou.

O lugar P_{01G3} representa a área em falta, ou seja, uma ficha nesse lugar indica a área onde ocorreu a falta. Os lugares $P3$ e $P4$ não têm representação física.

Figura 4.5: - Diagrama de bloco do Vão C da UHE Boa Esperança

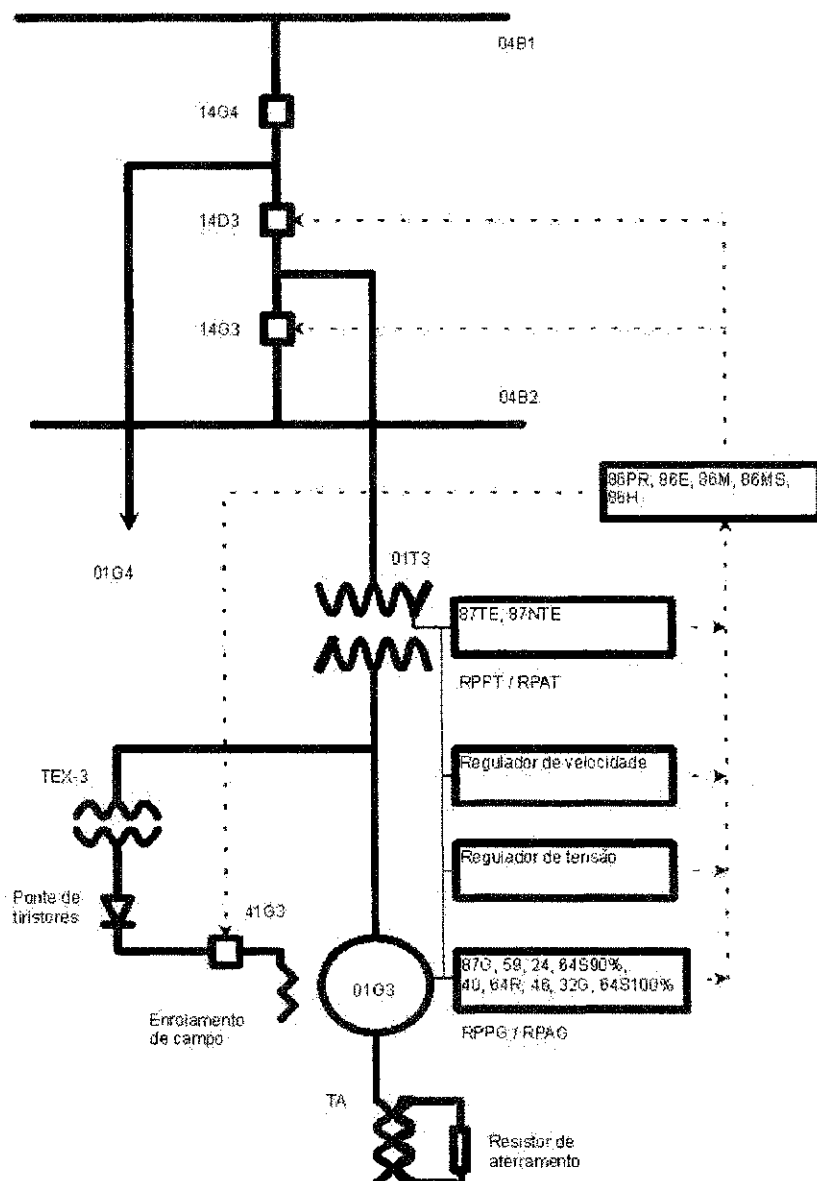
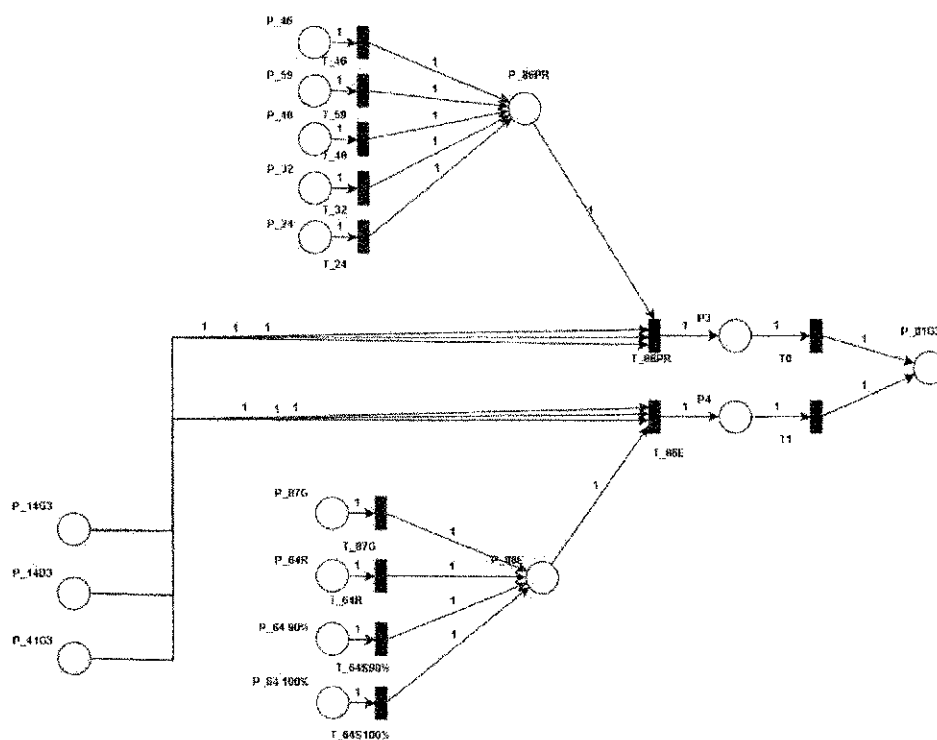


Figura 4.6. Modelo em rede de Petri das proteções do gerador da UHE Boa Esperança

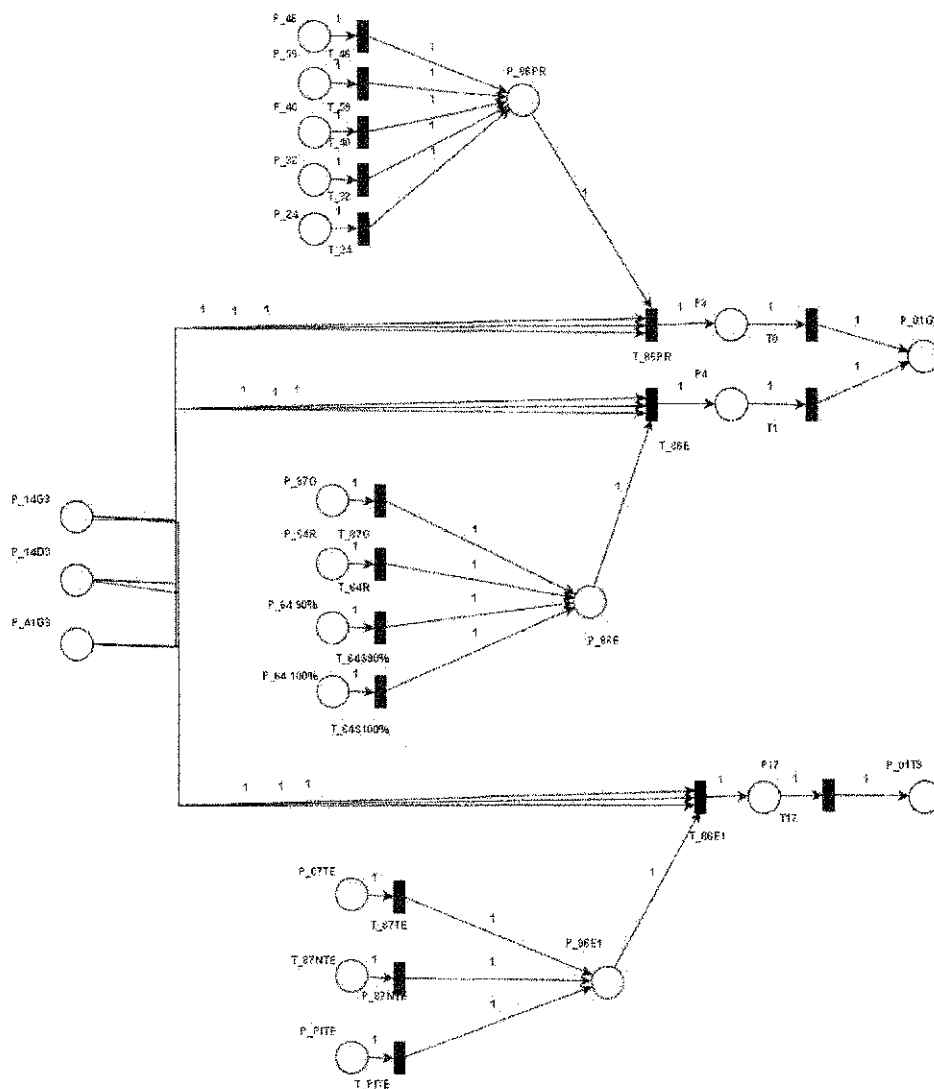


A dinâmica da rede inicia com a marcação dos lugares de disjuntores e relés em estado de falta. A transição habilitada é disparada, e ficha no lugar que representa o relé de bloqueio é colocada, onde é possível caracterizar qual relé de bloqueio atuou, dependendo da função de proteção é confirmando a atuação do relé de bloqueio. A próxima transição habilitada define a área em falta, colocando uma ficha no respectivo lugar da área em falta.

O modelo apresentado na Figura 4.7 é uma extensão do anterior, ou seja, acrescentamos as proteções de transformador representadas através dos lugares P_{87TE} , P_{87NTE} e P_{ITE} e área em falta, lugar P_{01T3} , ficha nesse lugar representa falta no transformador elevador. O lugar P_{86E1} tem a mesma representatividade física do lugar P_{86E} , ou seja, representa o relé de bloqueio 86E. A necessidade de criar um novo lugar para representar o relé 86E é para eliminar a concorrência que existia entre as transições T_{86E} e T_{86E1} , caso os lugares P_{87TE} , P_{87NTE} e P_{ITE} colocassem ficha no lugar P_{86E} , representando a proteção disparando o relé de bloqueio 86E conforme podemos ver na Tabela 3.1.

Neste caso, existiria um arco ligando o lugar P_{86E} a transição T_{86E1} , caracterizando portanto a concorrência entre as transições. Esse lugar ajudou também a modelar múltiplas

Figura 4.7: Modelo em rede de Petri das proteções do gerador e transformador da UHE Boa Esperança

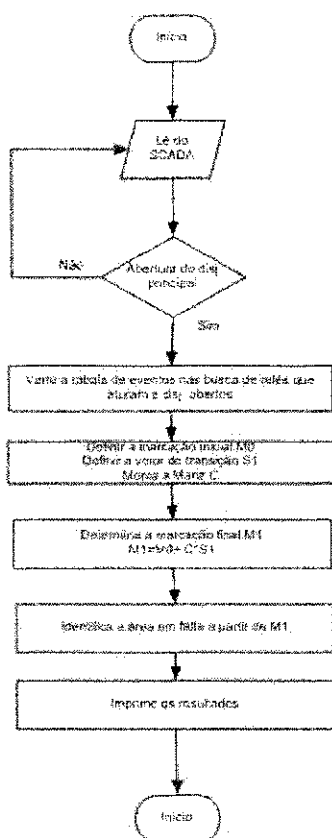


faltas, que possam ocorrer, ou seja, podemos ter faltas simultâneas nas áreas de gerador e transformador elevador.

4.3.3 Procedimento de diagnóstico

As informações de estado dos disjuntores e relés são recebidas do sistema SCADA e são repassadas ao modelo de rede Petri na forma de marcações iniciais. A partir da dinâmica da rede é feito o diagnóstico da falta e em seguida determinada a área onde ocorreu a falta. O algoritmo para determinação da causa raiz e apresentado a seguir:

Figura 4.8: Fluxograma do algoritmo para o diagnóstico



1. Varrer a tabela de eventos gerais na busca dos disjuntores e relés que atuaram e definir a marcação inicial da rede de Petri $M0$;
2. Determinar o vetor S , utilizando as informações de status dos relés.
3. Construir a matriz de incidência C de acordo com o modelo da rede de Petri;
4. Executar a dinâmica de transição da rede de Petri $M1$, de acordo com sua equação fundamental;
5. Calcular o vetor da marcação final $M1$;
6. Identificar a área em falta, como sendo o lugar que possui pelo menos uma ficha.

Quando ocorrem múltiplas falta, pode aparecer mais de uma ficha na área em falta. Neste caso não é possível afirmar qual a causa raiz mais relevante, porém, é possível restringir a área em falte que continua sendo uma informação importante para o operador, porque, delimita a área que ocorreu a falta. A seguir é apresentado um diagrama que representa este algoritmo para o diagnóstico.

4.3.4 Exemplo de Análise do diagnóstico

Nesta seção será analisada uma ocorrência, na qual foram registradas no SCADA as seguintes informações: os disjuntores principais 14G3 e 14D3 abriram o disjuntor de campo 41G3 também abriu e, o relé de proteção 32 atuou, causando *TRIP* na unidade geradora.

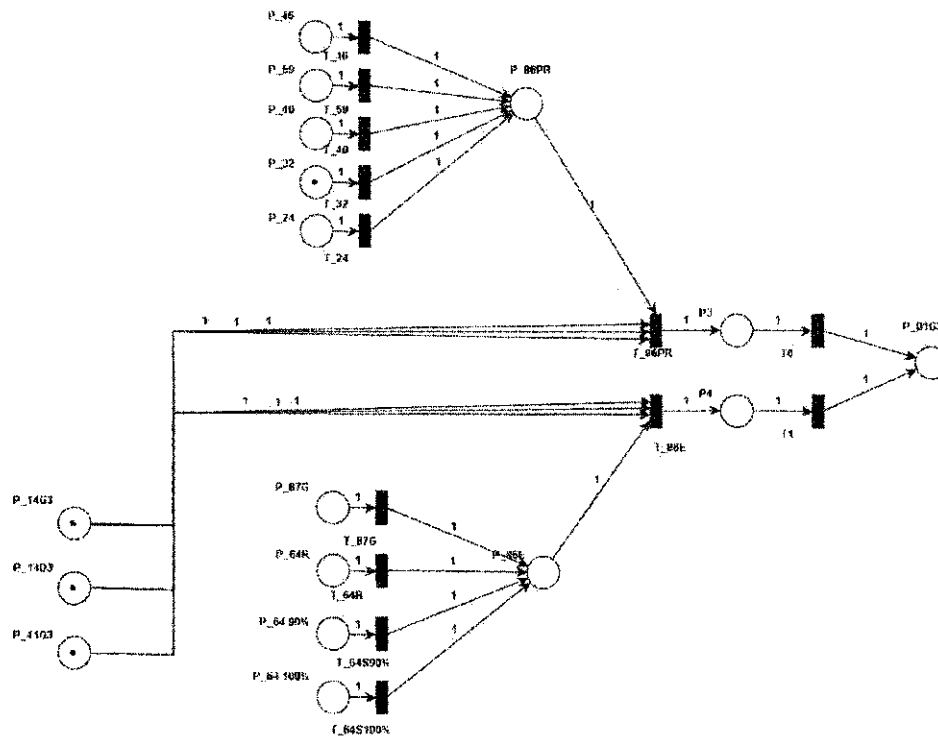
Com essas informações é gerado o vetor com a marcação inicial M_0 da rede, ilustrado a seguir.

$$M_0 = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \begin{matrix} P_{_01G3} \\ P_{_14D3} \\ P_{_14G3} \\ P_{_24} \\ P_{_32} \\ P_{_40} \\ P_{_41G3} \\ P_{_46} \\ P_{_59} \\ P_{_64S100\%} \\ P_{_64S90\%} \\ P_{_64R} \\ P_{_86E} \\ P_{_86PR} \\ P_{_87G} \\ P_3 \\ P_4 \end{matrix} \quad (4.1)$$

Esta marcação é apresentada na forma gráfica na Figura 4.9 - Marcação inicial da rede de Petri

O vetor S_1 é determinado pelo status das transições, ou seja, pelas transições que estão habilitadas a disparar, caracterizando o estado de falta da rede de Petri. O vetor deste estudo está representado a seguir. As linhas do vetor S_1 representam a transição e o número indica que a transição está habilitada, por exemplo, na Equação 4.14 a transição $T_{_32}$ está habilitada.

Figura 4.9: Marcação inicial da rede de Petri



$$S_1 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \begin{matrix} T_0 \\ T_1 \\ T_{64R} \\ T_{64S90\%} \\ T_{64S100\%} \\ T_{86PR} \\ T_{86E} \\ T_{46} \\ T_{59} \\ T_{40} \\ T_{32} \\ T_{24} \\ T_{87G} \end{matrix} \quad (4.2)$$

A matriz de incidência C do modelo armazena informações estruturais do vão da UHE que está sendo modelado, ou seja, essa matriz caracteriza a unidade geradora da UHE. A

matriz de incidência está representada a seguir. As linhas representam os lugares e as colunas às transições da RP. Quando o elemento da matriz tem 0 indica que o lugar e transição que define o elemento da matriz não estão conectados, ou seja, não existe nenhuma relação entre eles. Quando o elemento possui -1 indica que a transição retira ficha do lugar e se possui 1 indica que a transição coloca ficha no lugar caracterizando a relação entre o lugar e a transição correspondente.

De acordo com a Equação 2.9, M_1 pode ser expresso como na Equação 4.3 e 4.4.

$$M_1 = M_0 + C * S_1 \quad (4.3)$$

$$M_1 = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (4.4)$$

$$C = \begin{pmatrix} T_0 & T_1 & T_{64R} & T_{64S90\%} & T_{64S100\%} & T_{86PR} & T_{86E} & T_{46} & T_{59} & T_{40} & T_{32} & T_{24} & T_{87G} \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

(4.5)

$$M_1 = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \begin{matrix} P_{01G3} \\ P_{14D3} \\ P_{14G3} \\ P_{24} \\ P_{32} \\ P_{40} \\ P_{41G3} \\ P_{46} \\ P_{59} \\ P_{64S100\%} \\ P_{64S90\%} \\ P_{64R} \\ P_{86E} \\ P_{86PR} \\ P_{87G} \\ P_3 \\ P_4 \end{matrix} \quad (4.6)$$

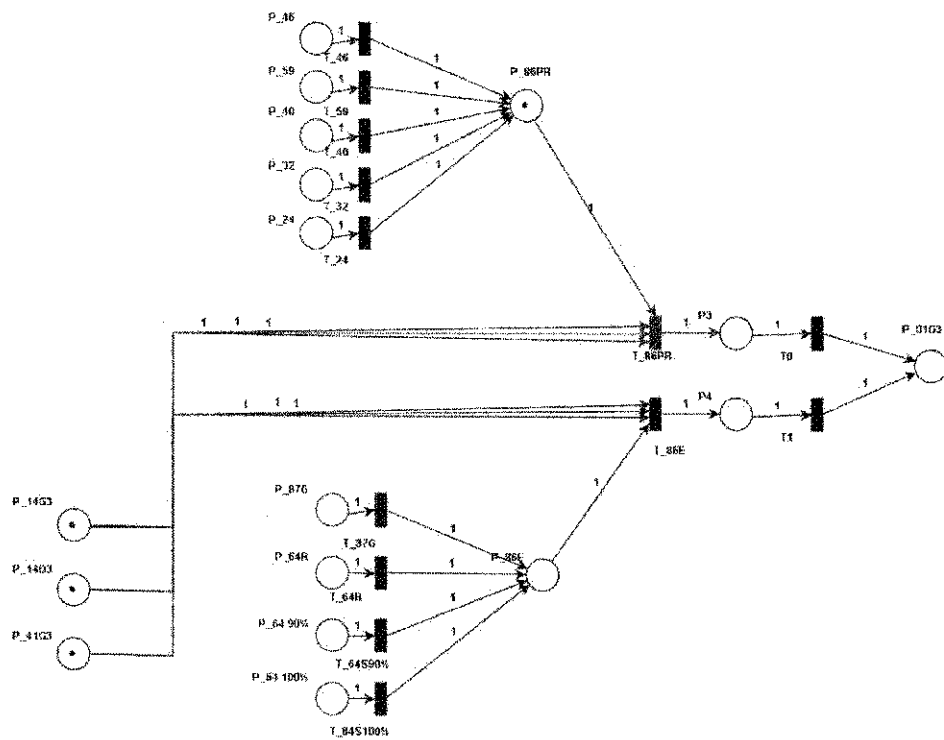
A marcação M_1 é um estado da rede de Petri que tem como característica física a confirmação da atuação do relé de bloqueio 86PR, a partir da ficha no lugar P_{86PR} .

O vetor M_1 define a distribuição de fichas após o disparo da transição habilitada T_{32} , que reflete no vetor S_1 . A próxima marcação é determinada pela Equação 4.7.

$$M_2 = M_1 + C * S_2 \quad (4.7)$$

onde:

Figura 4.10: Marcação da RP após o primeiro disparo (M1)



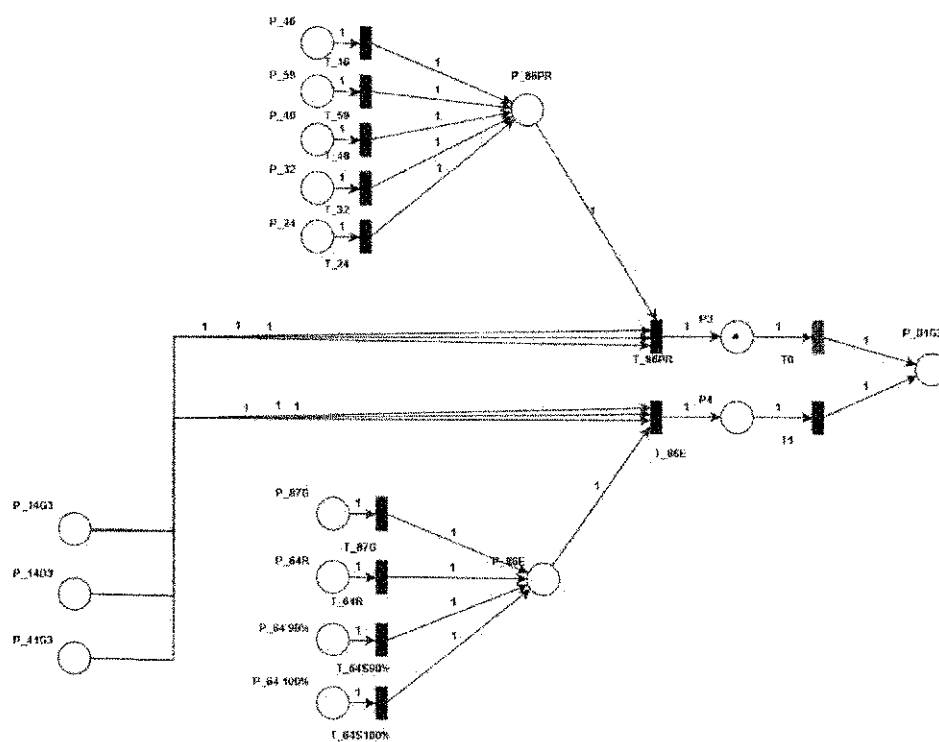
$$S_2 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \begin{matrix} T_0 \\ T_1 \\ T_{64R} \\ T_{64S90\%} \\ T_{64S100\%} \\ T_{86PR} \\ T_{86E} \\ T_{46} \\ T_{59} \\ T_{40} \\ T_{32} \\ T_{24} \\ T_{87G} \end{matrix} \quad (4.8)$$

$$M_2 = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} \begin{matrix} P_01G3 \\ P_14D3 \\ P_14G3 \\ P_24 \\ P_32 \\ P_40 \\ P_41G3 \\ P_46 \\ P_59 \\ P_64S100\% \\ P_64S90\% \\ P_64R \\ P_86E \\ P_86PR \\ P_87G \\ P3 \\ P4 \end{matrix} \quad (4.9)$$

A marcação M_2 não tem característica física, ou seja, é uma marcação transitória. A próxima transição habilitada é T_0 , definido o vetor S_3 e conseqüentemente o vetor M_3 .

$$M_3 = M_2 + C * S_3 \quad (4.10)$$

Figura 4.11: Marcação da RP após o segundo disparo (M2)



$$S_3 = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \begin{matrix} T_0 \\ T_1 \\ T_{64R} \\ T_{64S90\%} \\ T_{64S100\%} \\ T_{86PR} \\ T_{86E} \\ T_{46} \\ T_{59} \\ T_{40} \\ T_{32} \\ T_{24} \\ T_{87G} \end{matrix} \quad (4.11)$$

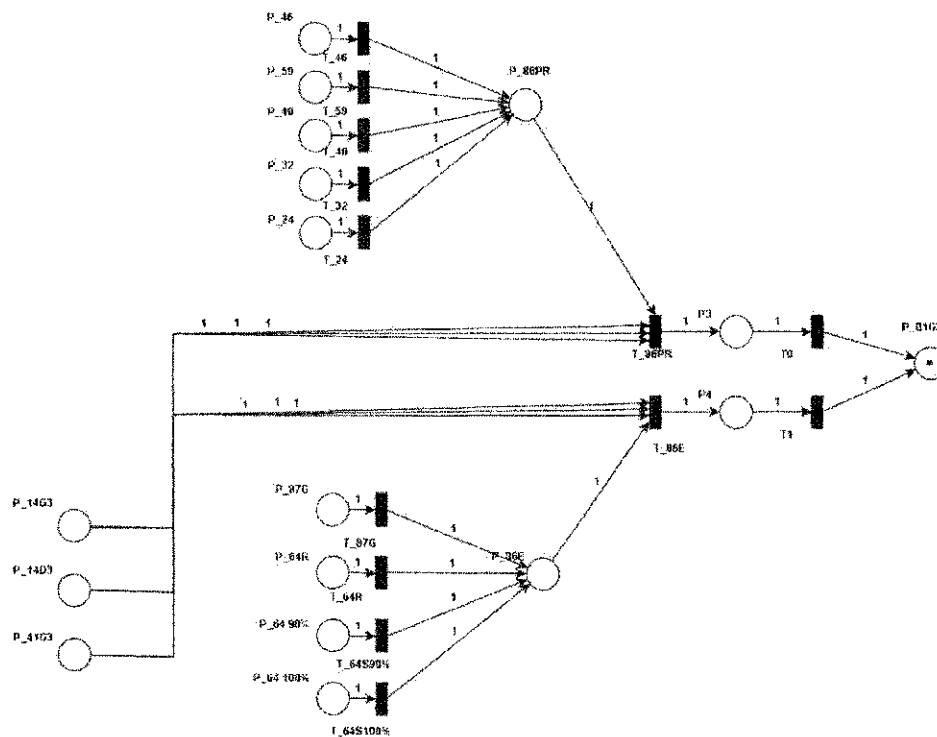
Tabela 4.2: Diagnóstico de ocorrência

Ocorrência	
Local:	UHE Boa Esperança
Unidade:	01G3
Área:	Gerador
Relé de bloqueio:	86PR
Proteção:	32G

$$M_3 = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \begin{matrix} P_{01G3} \\ P_{14D3} \\ P_{14G3} \\ P_{24} \\ P_{32} \\ P_{40} \\ P_{41G3} \\ P_{46} \\ P_{59} \\ P_{64S100\%} \\ P_{64S90\%} \\ P_{64R} \\ P_{86E} \\ P_{86PR} \\ P_{87G} \\ P_3 \\ P_4 \end{matrix} \quad (4.12)$$

Após o disparo de T_0 a rede chega ao seu estado estável com a marcação M_3 sem transição habilitada a disparar. Portanto o lugar que possui pelo menos uma ficha é considerado a área em falta, neste caso o lugar com ficha é o P_{01G3} que caracteriza falta na unidade geradora 01G3. Ver Tabela 4.2.

Figura 4.12: Marcação final da RP (M3)



4.4 Estudo de Caso 1

Este estudo de caso se fundamenta em um ocorrência real, registrada no dia 29/09/1996 às 10:13h, com parada total da unidade 01G3 da UHE Boa Esperança. Tratou-se de uma falta do tipo fase terra no estator, com atuação do relé 64G (terra no estator). Esta falta levou à atuação do relé de bloqueio 86E (parada total com rejeição de carga) e à abertura automática dos disjuntores: 14G3, 14D3 e 41G3. A causa da falta, constante do relatório da ocorrência foi um parafuso solto entre as barras do estator e a ranhura do núcleo do gerador ocasionando um curto-circuito fase terra no estator.

A Tabela 4.3 apresenta os eventos registrados pelo SCADA, cujos dados serão usados no modelo da rede de Petri (RP). Os demais eventos no decorrer da ocorrência não foram representados devido ao volume de dados relacionado e por não acrescentarem ao processo de validação do diagnóstico.

Os eventos da tabela estão apresentados em ordem cronológica. As informações de tempo foram omitidas para evitar sobrecarga no texto porém em um sistema de diagnóstico de faltas (SDF-UHE) essa informação será utilizada para determinar o tamanho da janela de exibição

dos eventos. As informações dos eventos, extraídas para determinar a marcação inicial da RP, são utilizados para montar uma tabela de eventos, como ilustrado na Tabela 4.3.

Tabela 4.3: Eventos do caso 1 extraído do SCADA

Tag	Descrição
UBE-01G3-RPPG-PTOV3	RPAG - 64S - TRIP FALTA TERRA NO ESTATOR 90%
UBEUCG3862AT	86-2 RELE DE BLOQUEIO ATUADO
UBE-UCG3-14G31-CA	ABERTURA 1 DISJUNTOR 14G3 (RELÉ DE POTÊNCIA)
UBE-UCG3-14D31-CA	ABERTURA 1 DISJUNTOR 14D3 (RELÉ DE POTÊNCIA)
UBE-RTG3-41-A	RT-41-KM - DISJUNTOR DE CAMPO ABERTO

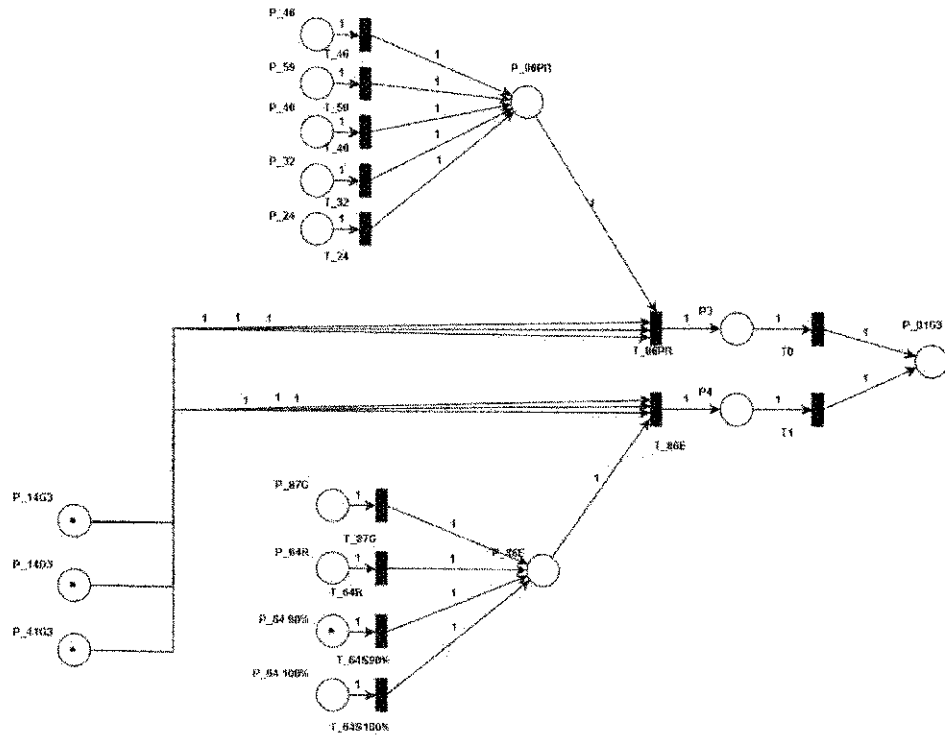
Com a tabela de eventos montada é possível definir a marcação inicial e o vetor de controle. Dentro os eventos relacionados na Tabela 4.3, destaca-se a atuação do RPPG (relé de proteção principal do gerador) da unidade 01G3, com a função PTOV3, que se refere à função 64S (Terra no estator 90%) do código ANSI (anexo A). Com esta informação coloca-se uma ficha no lugar $P_{64S90\%}$ da RP.

Na figura 4.13 percebe-se a abertura dos disjuntores 14G3 (disjuntor principal), 14D3 (disjuntor principal) e do disjuntor 41 (disjuntor de campo eletromagnético). O relé de bloqueio¹ 86-2, também atuou.

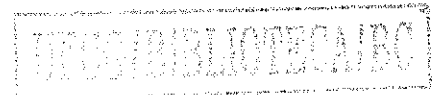
A marcação correspondente a esta ocorrência é apresentada no vetor $M0$ a seguir:

¹A UHE Boa esperança não utiliza a nomenclatura 86PR, 86E, 86M, 86MS e 86H para os relés de bloqueio. A nomenclatura usada é 86-1, 86-2, 86-3, 86-4 e 86-5 respectivamente.

Figura 4.13: Marcação Inicial da RP para o caso 1



$$M_0 = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \begin{matrix} P_{01G3} \\ P_{14D3} \\ P_{14G3} \\ P_{24} \\ P_{32} \\ P_{40} \\ P_{41G3} \\ P_{46} \\ P_{59} \\ P_{64S100\%} \\ P_{64S90\%} \\ P_{64R} \\ P_{86E} \\ P_{86PR} \\ P_{87G} \\ P_3 \\ P_4 \end{matrix} \quad (4.13)$$



O vetor $M0$ recebe a marcação com 1 nos lugares P_{14D3} , P_{14G3} , P_{41G3} para representar a informação de que os disjuntores estão abertos. O lugar $P_{64S90\%}$ também recebe uma ficha devido à informação da atuação do relé.

O vetor S representa a sequência de disparo possível para chegar à marcação fina da Equação 2.10. Esse vetor é marcado com a informação dos relés que atuaram.

$$S = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \begin{matrix} T0 \\ T1 \\ T_{64R} \\ T_{64S90\%} \\ T_{64S100\%} \\ T_{86PR} \\ T_{86E} \\ T_{46} \\ T_{59} \\ T_{40} \\ T_{32} \\ T_{24} \\ T_{87G} \end{matrix} \quad (4.14)$$

A marcação final Mf é calculada a partir da Equação 2.10. Considerando que o lugar P_{01G3} no vetor Mf possui 1 ficha, portanto, a falta ocorreu no área do gerador da unidade 3.

$$M_f = \begin{pmatrix} 1 & P_01G3 \\ 0 & P_14D3 \\ 0 & P_14G3 \\ 0 & P_24 \\ 0 & P_32 \\ 0 & P_40 \\ 0 & P_41G3 \\ 0 & P_46 \\ 0 & P_59 \\ 0 & P_64S100\% \\ 0 & P_64S90\% \\ 0 & P_64R \\ 0 & P_86E \\ 0 & P_86PR \\ 0 & P_87G \\ 0 & P3 \\ 0 & P4 \end{pmatrix} \quad (4.15)$$

Diagnóstico:

Ocorrência	
Local:	UHE Boa Esperança
Unidade:	01G3
Área:	Gerador
Relé de bloqueio:	86E
Proteção:	64S

4.5 Considerações Finais

Neste capítulo foi apresentada a abordagem proposta para o diagnóstico de falta em UHEs, a partir da modelagem das proteções da usina em redes de Petri. Nele foi apresentado o modelo da proteção elétrica de uma unidade geradora. O modelo foi aplicado a um vão da UHE Boa Boa Esperança (BE), alvo deste trabalho. E por fim foi apresentado um exemplo, construído a partir de uma ocorrência na UHE BE.

5 CONCLUSÕES

Foi apresentado uma nova abordagem para diagnóstico diagnóstico de falta em uma usina hidrelétrica (UHE). A abordagem consiste em modelar o sistema de proteção da usina em rede de Petri, e foi validado usando o histórico de ocorrências de falta na Usina Hidroelétrica de Boa Esperança de 237,3MW, pertencente ao parque de geração da Companhia Hidroelétrica do São Francisco (CHESF) que está tendo os sistemas de proteção e controle modernizados, apresentado, portanto as condições ideais para levantar os dados necessários para a modelagem.

A abordagem concentra à análise do diagnóstico na unidade geradora definido as áreas de falta nos principais equipamentos ou subsistema que compõe a unidade geradora com isso é possível identificar a causa raiz que gerou a falta com mais precisão.

O modelo em rede de Petri usado na abordagem usa as funções de proteção, que é um forte aliado no diagnóstico da falta em uma unidade geradora, porque as proteções da unidade geradora são utilizadas normalmente para evitar um problema específico. Por exemplo, quando atua a função 64R (falta a terra no rotor) do relé principal do gerador, há grandes possibilidades da falta ter ocorrido no rotor do gerador.

O modelo foi aplicado na análise de uma ocorrência real da UHE, e demonstrou ser capaz de identificar a área em falta. O modelo consiste em organizar a unidade geradora em quatro áreas de diagnóstico: a área do gerador e turbina, a área de regulação de velocidade, a área de regulação de tensão e a área dos mancais, e propõe através das informações do relé de proteção e dos disjuntores, localizar na UHE a área na qual ocorreu a falta.

Dado o escopo da pesquisa, os esforços de modelagem se concentraram na área do

gerador e turbina, embora este modelo possa ser aplicado para as demais áreas de proteção visando chegar a um diagnóstico.

No seu estágio atual, diante dos resultados alcançados concluí-se que esta estratégia para elaboração de diagnóstico utilizando a modelagem do comportamento das proteções em redes de Petri, em UHE é promissora; particularmente devido ao aspecto modular do modelo, o que facilita sua adequação a outras áreas de falta e outras usinas.

Por fim, comparada a outras soluções, esta apresenta maior facilidade de aplicação devido as características matemáticas da rede de Petri, e o cálculo das matrizes esparsas que diminui o esforço computacional necessário ao diagnóstico.

5.1 Trabalhos Futuros

Como propostas de trabalhos futuros destacam-se aqueles listados a seguir:

- Estender o modelo apresentado para modelar outras áreas de diagnósticos, regulação de velocidade, regulação de tensão, mancal;
- Criar uma ferramenta SDF-UHE de diagnósticos de falta em UHE. com base no modelo estendido.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] T. Murata, "Petri nets: Properties, analysis and applications," *IEEE*, vol. 77, no. 4, 1989.
- [2] M. M. Mansour, M. A. Wahab, and S. M. Wael, "Petri nets for fault diagnosis of large power generation station," in *Ain Shams Engineering Journal* 4, 2013, pp. 831 –842.
- [3] A. N. Duarte, "Tratamento de evento em redes elétricas: Uma ferramenta," Dissertação de Mestrado, Departamento de Sistemas e Computação, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, Brasil, Jan. 2003.
- [4] W. M. Soliman, B. E. D. H. Soudy, M. A. A. Wahab, M. M. Mansour *et al.*, "Power generation station faults diagnosis based on fuzzy relations using information of protective relays and circuit breakers," in *IEEE/PES*, 2009.
- [5] J. Cardoso and R. Valette, *Redes de Petri*, 1997.
- [6] A. a. ANSI/IEEE C37.2, "IEEE standard for electrical power," 2008.
- [7] A. Ashouri, A. Jalilvand, R. Noroozian *et al.*, "Fault diagnosis modeling of power systems using petri nets," Shah Alam, Selangor, Malaysia, Jun. 2010.
- [8] F. Bause, P. S. Kritzinger *et al.*, *Stochastic Petri Nets*, 2002.
- [9] J. R. Bezerra, "Metodologia para desenvolvimento de sistema de diagnostico de faltas em subestações de sistemas elétricos de potência baseado em redes de petri," Master's thesis, Universidade Federal do Ceará - Departamento de Engenharia Elétrica, Fortaleza, Ceará, Brasil, 2004.
- [10] P. Bonet, C. M. Lladó, R. Puigjaner, and W. J. Knottenbelt, "Pipe v2.5: a petri net tool for performance modeling," *Department of Computing - Imperial College London*, 2007.
- [11] J. M. Lima, *Usinas Hidrelétricas: diretrizes básicas para proteção e controle*, Synergia, Ed., 2009.

- [12] K. L. Lo, H. S. Ng, and J. Trecat, "Power systems fault diagnosis using petri nets." ser. IEEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, vol. 144, no. 3, May 1997, pp. 231– 236.
- [13] C. C. Fattori, C. H. Kano, F. Jimqileira *et al.*, *Rede de Petri e o aplicativo Platform Independent Petri net Editor (PIPE)*, escola politécnica da universidade de são paulo ed.