

Pontifícia Universidade Católica de Goiás
Programa de Mestrado em Engenharia de Produção e Sistemas

**MODELAGEM DOS SISTEMAS DE
PROTEÇÃO E FALHAS DE UMA
SUBESTAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO
UTILIZANDO REDES DE PETRI**

Juliano Resende Bucchianeri

Goiânia – Goiás
Setembro 2018

MODELAGEM DOS SISTEMAS DE PROTEÇÃO E FALHAS DE UMA SUBESTAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO UTILIZANDO REDES DE PETRI

Juliano Resende Bucchianeri

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas da Pontifícia Universidade Católica de Goiás, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção e Sistemas.

Orientador: Dr. Clarimar José Coelho.

Co-orientador: Dr. Rafael Viana de Carvalho.

Goiânia – Goiás
Setembro 2018

Dados Internacionais de Catalogação da Publicação (CIP)
(Sistema de Bibliotecas PUC Goiás)

B918m Bucchianeri, Juliano Resende
Modelagem dos sistemas de proteção e falhas de uma subestação de distribuição utilizando redes de PETRI [manuscrito] / Juliano Resende Bucchianeri; Orientação de Prof. Dr. Clarimar José Coelho e Dr. Rafael Viana de Carvalho. -- 2018.
96 f.; il.; 30 cm

Texto em português com resumo em inglês.
Dissertação (mestrado) - Pontifícia Universidade Católica de Goiás, Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Engenharia de Produção e Sistemas, Goiânia, 2018

Inclui referências, f. 69-71

1. Energia elétrica – interrupções de fornecimento - prevenção. 2. Energia elétrica - Distribuição - Redes de Petri. I.Coelho, Clarimar José. II.Carvalho, Rafael Viana de. III.Pontifícia Universidade Católica de Goiás. IV. Título.

CDU: 621.31(043)

MODELAGEM DOS SISTEMAS DE PROTEÇÃO E FALHAS DE UMA SUBESTAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO UTILIZANDO REDES DE PETRI

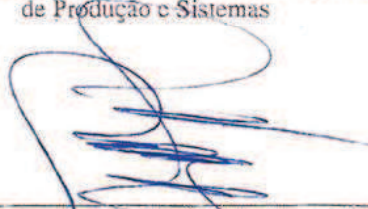
Juliano Resende Bucchianeri

Esta Dissertação julgada adequada para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção e Sistemas, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas da Pontifícia Universidade Católica de Goiás em Setembro de 2018.

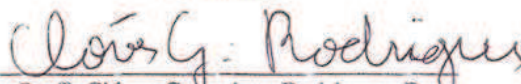


Prof.^o Marcos Lajovic Carneiro
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia
de Produção e Sistemas

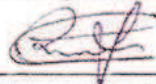
Banca Examinadora:



Prof.^o Clarimar José Coelho, Dr.
Orientador



Prof.^o Clóves Gonçalves Rodrigues, Dr.



Prof.^o Cléver Reis Stein, Dr.

Goiânia – Goiás

Setembro 2018

DEDICATÓRIA

À memória de minha mãe Rosely Resende Bucchianeri.
Exemplo de amizade, companheirismo e amor. Um dia
nos reencontraremos.

AGRADECIMENTOS

A Deus,

À minha querida mãe Rosely Resende Bucchianeri, minha grande amiga e incentivadora.

Aos meus orientadores Dr. Clarimar José Coelho e Dr. Rafael Viana de Carvalho pela oportunidade, apoio, amizade, paciência e empenho, fatores determinantes na condução dessa árdua jornada.

À minha namorada Geovana, que foi minha luz guia e meu bálsamo nas trevas desse tortuoso caminho.

Ao meu grande companheiro Luan Leão de Judá, onde a sua simples presença me acalentava nas noites em claro de trabalho.

Ao Dr. Cléver Reis Stein, pelo apoio e orientações na conclusão da dissertação, por ocasião de sua submissão à banca.

Ao amigo Issam Kolailat Sobrinho, que não me deixou desistir.

Ao Ernani, pelas valiosas dicas e conselhos.

Aos demais professores do Programa, em especial ao Professor Dr. Clóves Golçaves Rodrigues pelo apoio e orientações na conclusão da dissertação.

E aos demais colegas do Programa de Mestrado em Engenharia de Produção e Sistemas pela amizade e incentivo.

“Tente uma, duas, três vezes se possível tente a quarta, a quinta e quantas vezes for necessário. Só não desista nas primeiras tentativas, a persistência é amiga da conquista. Se você quer chegar onde a maioria não chega, faça aquilo que a maioria não faz.”

Bill Gates

MODELAGEM DOS SISTEMAS DE PROTEÇÃO E FALHAS DE UMA SUBESTAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO UTILIZANDO REDES DE PETRI

Juliano Resende Bucchianeri

2018

Orientador: Dr. Clarimar José Coelho.

Co-orientador: Dr. Rafael Viana de Carvalho.

RESUMO: O fornecimento adequado e seguro de energia elétrica impacta diretamente na sociedade atual. O aumento da demanda torna favorável o crescimento dos sistemas de eletricidade, sobretudo nas redes e subestações de distribuição, pois estas são responsáveis por rebaixar a tensão elétrica, permitindo assim distribuição de energia para a população. Manter as redes e subestações de distribuição funcionando, sem interrupções ou descontinuidade, é de suma importância para a manutenção do fornecimento de eletricidade, sendo necessário implementar meios para localizar e melhorar as proteções elétricas afim de diminuir as falhas ou a suspensão da distribuição desta. As falhas da distribuição podem resultar de descargas atmosféricas, sobrecorrente, curtos-circuitos, sobretensões, vazamento de óleo nos transformadores, falha de impedância etc. O presente trabalho expõe o problema dos possíveis defeitos que resultam no desligamento da subestação e objetiva reduzir a quantidade e a frequência dos desligamentos da subestação, colaborando para o aumento na produção industrial. Para isso, desenvolveu modelos qualitativos e quantitativos utilizando redes de Petri de uma subestação elétrica de distribuição, utilizando cenários de simulação para apontar possíveis melhorias nas proteções diminuindo as incorreções e interrupções.

Palavras-chave: Subestações Elétricas, Redes de Petri, Simulação.

MODELAGEM DOS SISTEMAS DE PROTEÇÃO E FALHAS DE UMA SUBESTAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO UTILIZANDO REDES DE PETRI

Juliano Resende Bucchianeri

2018

Orientador: Dr. Clarimar José Coelho.

Co-orientador: Dr. Rafael Viana de Carvalho.

ABSTRACT: The appropriated and secure supply of electrical energy directly impacts on the present society. The increase in demand favors the growth of electrical systems, especially in distribution networks and substations, since they are responsible for lowering the electrical voltage, allowing energy distribution to the population. To keep distribution networks and substations running, without interruption or discontinuity, is utmost importance for the maintenance of electric power supply, and it is necessary to implement means to locate and improve the electrical protections in order to reduce failures or to suspend the electricity distribution. Distribution failures may result from lightning, overcurrent, short circuits, overvoltages, oil leakage on transformers, impedance failure etc. The present work presents the problem of possible defects that result in the substation power blackout, and aims to reduce the amount and frequency of substation power blackouts, contributing to the increase in industrial production. In this regard, qualitative and quantitative models using Petri nets of an electrical substation of distribution were developed, using simulation scenarios to indicate possible improvements in the electrical protections, reducing the inaccuracies and interruptions.

Keywords: Electrical Substations, Petri Nets, Simulation.

SUMÁRIO

Capítulo 1 – Introdução	12
Capítulo 2 – Subestação Elétrica e as Principais Falhas.....	17
2.1 Introdução	17
2.2 Subestações Elétricas (SE).....	19
2.2.1 Componentes:	19
2.2.2 Classificação da subestação modelada.....	20
2.2.3 Sistemas da subestação em estudo	21
2.3 Distribuição de energia elétrica	22
2.4 Falhas ou defeitos em subestações elétricas	23
2.4.1. Descargas atmosféricas:.....	24
2.4.2. Sobrecarga:	24
2.4.3. Falhas na isolação:	24
2.4.4. Sobretensões:	25
2.4.5. Umidade no transformador de potência:.....	25
2.4.6. Curtos Circuitos:	26
2.4.7. Perdas das propriedades isolantes do óleo do transformador:	26
2.4.8. Falha de impedância	27
Capítulo 3 – Redes de Petri.....	28
3.1 Introdução	28
3.2 Notação Gráfica	28
3.3 Paradigma das Redes de Petri.....	31
3.4 Notação Matemática Para Redes de Petri	34
3.5 Propriedades das Redes de Petri	34
Capítulo 4 – Modelo Qualitativo	37
4.1 Introdução	37
4.2 <i>Softwares</i> utilizado na modelagem e análise do modelo	38
4.3 Modelo Hierárquico	39
4.3.1 Nível Principal	39
4.3.2 Nível secundário (SDF AT).....	41
4.3.3 Nível secundário (SDF TR)	42
4.3.4 Nível secundário (SDF AL).....	45
4.3.5 Nível secundário (SDF BC).....	47

4.4 Analise Estrutural	49
5.1 Introdução	51
5.3 Simulação.....	53
5.3.1 Cenário 1	54
5.3.2 Cenário 2.....	56
5.3.3 Cenário 3.....	58
5.3.4 Cenário 4.....	60
Capítulo 6 – Conclusão e Recomendações para Estudos Futuros	67
6.1 Conclusão.....	67
6.2 Trabalhos Futuros	68
Referências	69
APÊNDICE A	72
APÊNDICE B.....	76
APÊNDICE C	83
APÊNDICE D	86
APÊNDICE E.....	90
APÊNDICE F.....	92

LISTA DE TABELAS E QUADROS

Tabela 5.1: Descargas atmosféricas por ano ocorridas na rede elétrica da subestação	52
Tabela 5.2: Falhas do elo fusível da subestação	52
Tabela 5.3: Curtos-circuitos por ano ocorridos na rede elétrica da subestação	53
Tabela 5.4: Falhas do para-raios da subestação	53

LISTA DE FIGURAS

Fig. 2.1:	Estrutura de um Sistema Elétrico de Potência	17
Fig. 2.2:	Desenho esquemático dos sistemas da subestação.....	22
Fig. 3.1:	Formalismo gráfico em uma rede de Petri	29
Fig. 3.2:	Modelo em redes Petri para a reação química da formação da molécula de água: (A) Componentes das redes de Petri (Estado, Transição, Arco, Marcação; (B) Disposição correta das Marcações; (C) Forma correta de se conectar os elementos do formalismo; (D) Demonstração da regra de disparo	30
Fig. 3.3:	Estrutura paradigmática do formalismo das redes de Petri.....	32
Fig. 4.1:	Diagrama correspondente ao modelo hierárquico do sistema de falhas na Subestação Elétrica	38
Fig. 4.2:	Redes de Petri representando o sistema principal de falhas (SDF).....	40
Fig. 4.3:	Modelo Qualitativo do (SDF-AT)	41
Fig. 4.4:	Modelo Qualitativo do (SDF TR)	43
Fig. 4.5:	Modelo Qualitativo do (SDF TR)	44
Fig. 4.6:	Modelo Qualitativo do (SDF TR)	45
Fig. 4.7:	Modelo Qualitativo SDF (AL)	46
Fig. 4.8:	Modelo Qualitativo SDF (BC).....	48
Fig. 4.9:	Modelo Qualitativo SDF (BC).....	49
Fig. 5.1:	Modelo Quantitativo	51
Fig. 5.2:	Cenário 1	55
Fig. 5.3:	Cenário 2	57
Fig. 5.4:	Cenário 3	59
Fig. 5.5:	Curva elo fusível com religador para curto circuito fase fase.....	61
Fig. 5.6:	Curva elo fusível com religador para curto circuito fase terra.....	63
Fig. 5.7:	Cenário 4	65

Capítulo 1 – Introdução

As características da sociedade moderna, tais como a evolução tecnológica e o desenvolvimento industrial, tornam o mundo atual cada vez mais dependente da energia elétrica. Essas necessidades, associadas aos padrões de qualidade de serviço regidos pelos órgãos e agências reguladoras, refletem nos sistemas e redes de eletricidade, originando um acréscimo de complexidade e dimensões destes, assim como um aumento da sua importância. O crescimento dos sistemas e das redes de eletricidade trazem consequências em todos os componentes, em particular aos componentes das redes de distribuição e subestações de distribuição, por estarem mais próximas aos clientes finais. A ocorrência de defeitos nas redes de distribuição ou subestações de distribuição pode causar a interrupção da eletricidade causando inúmeros prejuízos aos consumidores finais, como também perdas de receitas e multas para as concessionárias elétricas. (GIL, 2009).

Nesse sentido, a fim de colaborar para melhorias desse cenário, definiu-se como temática para essa pesquisa o modelo de falhas e proteções de uma subestação de distribuição. O objetivo é utilizar a modelagem qualitativa e quantitativa das redes de Petri para simular as possíveis falhas e apontar melhorias nas proteções elétricas no intuito de reduzir os desligamentos ou interrupções da subestação. A delimitação do tema foi determinado a partir da localização de defeitos nas redes de distribuição que geram interrupções, apresentando-se como uma tarefa difícil e morosa, sendo esta situação, na maioria das vezes, justificada pela complexidade das subestações de distribuição. As falhas que geram defeitos ou desligamento da subestação de distribuição precisam ser alvo de análises e investigações, com o objetivo de se prever ou reduzir as interrupções no fornecimento de energia (SOUZA, 2008).

Como a justificativa desse estudo é desenvolver um modelo para se realizar simulações das falhas, são apresentando cenários de possíveis soluções que contribuam com a diminuição da frequência e duração das interrupções.

As falhas, dependendo da sua evolução no tempo, podem ser consideradas como: falhas abruptas (mudanças rápidas nas variáveis do processo), falhas incipientes (mudanças que evoluem lentamente com o transcorrer do tempo) e falhas intermitentes (mudanças que aparecem e desaparecem no tempo) (ISERMANN, 1997).

A modelagem do sistema elétrico será realizada com o auxílio das redes de Petri. As Redes de Petri são uma ferramenta matemática com visualização gráfica, capazes de modelar, analisar e implementar diferentes sistemas (MURATA, 1989). Dentre as principais vantagens do uso das redes de Petri como ferramenta de modelagem e simulação, podemos citar:

- Possuem uma representação gráfica intuitiva que proporciona modelos diretamente executáveis;
- Possui fundamentos matemáticos bem definidos proporcionando técnicas de análise;
- Abordam propriedades estruturais e comportamentais e as suas relações ao modelo;
- Integram métodos qualitativos e quantitativos, bem como técnicas de análise e simulação/animação;
- Cobrem métodos discretos e contínuos, deterministas e estocásticos, sequenciais e concorrentes, incluindo técnicas híbridas para modelagem qualitativa/quantitativa;
- Possuem uma vasta gama de ferramentas para apoiar a implementação, simulação e análise dos modelos;

As redes de Petri têm sido aplicadas na modelagem, análise e implementação de sistemas de controle, restauração, e diminuição dos tempos de interrupção por falhas em sistemas de distribuição (YANG e YOKOHAMA, 1995; LO et al, 1997; SAMPAIO et al 2003; SÁ, 1990; SANTOS, 2007).

Foi realizado um estudo no sentido da aplicação de redes de Petri para desenvolver uma modelagem qualitativa e quantitativa dos sistemas de processos utilizados na automatização, proteções e controles em uma subestação, focando nessas três áreas sem muito destaque para as falhas ocorridas (BRAND e KOPAINSKY, 1984). Como extensão do trabalho anterior, Brand e Kopainsky apresentaram os conceitos da engenharia para os controles dos sistemas dos processos em uma subestação. Nesse trabalho apresentou-se, também, a modelagem dos controles com o uso das redes de Petri. Foi utilizada uma modelagem qualitativa e quantitativa dos sistemas, entretanto não foram realizadas simulações de cenários (BRAND e KOPAINSKY, 1988).

Em 1997 foi desenvolvido um trabalho sobre as análises, estudos e desenvolvimento nas modelagens e seguintes implementações de sistemas elétricos de potência com as redes Petri, obteve-se como resultado o desenvolvimento do controle automático nas subestações, sendo tal controle baseado em softwares de supervisão, em que conseguiu-se realizar a modelagem qualitativa sem realizar a simulação do sistema (TANG e WANG, 1997). Em outro trabalho, as redes de Petri também foram utilizadas para realizar a modelagem de um sistema de proteção em uma linha de transmissão, com um sistema formado por relés de proteção diretos e um religador automático para curtos-circuitos. O modelo proposto por esses autores foi fundamentado em um sistema de proteção de uma linha de alta tensão. Eles apresentaram no final de seu trabalho a modelagem qualitativa e quantitativa do sistema da linha de transmissão, com a simulação do sistema (TANG e WANG, 2001).

Na dissertação de Sampaio, elaborou-se um modelo para detecção e diagnóstico de falhas utilizando redes de Petri Coloridas. Esse modelo desenvolvido apresentou, através dos formalismo gráficos e matemáticos das redes de Petri Coloridas, as funções de cada relé que estavam atuados. Além disso, foram modelados os equipamentos que estavam em operação no momento de uma falha através dos alarmes gerados, assim simulando, detectando e

diagnosticando as falhas na subestação elétrica de distribuição em estudo (SAMPAIO, 2002). Essa dissertação tem como problema as falhas que provocam os desligamentos e interrupções no sistema elétrico de distribuição de uma indústria prejudicando a qualidade e o fornecimento de energia impactando na produtividade industrial. Como hipótese estão as modelagens qualitativas e quantitativas das Rede de Petri que foram utilizadas como ferramentas na simulação e visualização das melhorias dos sistemas de proteção.

Na modelagem qualitativa, a classe que se melhor adapta é a rede de **Estado/Transição** ou rede de Petri qualitativa (QPN). Esse tipo de classe de rede de Petri é indicada na modelagem de sistemas com eventos discretos sem dependência do tempo ou probabilidade. Entretanto, na modelagem quantitativa, é necessário o uso das classes de redes de Petri estocásticas (SPN) que utilizam probabilidades na representação de eventos estocásticos que são os eventos que contam com a aleatoriedade. Por fim, com o modelo proposto, foram realizados cenários de simulação para análise do sistema estudado. Foram definidos como objetivo geral: redução da quantidade e frequência das falhas que provoquem desligamentos ou interrupções do fornecimento elétrico. Já como objetivos específicos, foram estabelecidos: a) Modelar qualitativamente usando redes de Petri qualitativas (QPN), os sistemas de proteção e falhas da subestação em estudo; b) Modelar quantitativamente usando as redes de Petri estocásticas (SPN), um sistema de proteção e uma falha da subestação em estudo; e c) Simular o modelo quantitativo com a criação de cenários. Para o cumprimento dos objetivos propostos, foi utilizada como metodologia a representação da subestação de distribuição elétrica por um modelo hierárquico com dois níveis. A primeira modelagem realizada foi a qualitativa sendo realizada por redes de Petri de **Estado/Transição**. Uma vez o modelo qualitativo pronto, será realizada a modelagem quantitativa, considerando os dados e informações coletados. Através do modelo quantitativo, pretende-se realizar cenários de simulação. O intuito é analisar e indicar

melhorias em diferentes cenários afim de melhorar as proteções elétricas com a redução do impacto das falhas na subestação.

A fim de melhor realizar tal pesquisa, as discussões aqui realizadas foram divididas em CAPÍTULO 1 – Introdução, apresentando os aspectos descritivos da pesquisa e o estado da arte. O CAPÍTULO 2 – Mostra uma visão geral do sistema elétrico de distribuição e uma subestação utilizada como modelo para o estudo desse trabalho; Já o CAPÍTULO 3 – apresenta as redes de Petri com seu formalismo matemático e gráfico, o paradigma e as suas extensões; O CAPÍTULO 4 – Apresenta a modelagem qualitativa com o levantamento dos **Estados** e **Transições** dos sistemas abordados na subestação. No CAPÍTULO 5 – É apresentado o modelo quantitativo em redes de Petri estocásticas também nesse capítulo ocorrem os cenários de simulação. Por fim, o CAPÍTULO 6 – Traz consigo as conclusões do estudo realizado.

Capítulo 2 – Subestação Elétrica e as Principais Falhas

2.1 Introdução

Nesse capítulo será abordado as características de uma subestação elétrica, seus principais componentes e as falhas mais comuns que interrompem o funcionamento das subestações e que serão modeladas nos capítulos posteriores.

O sistema elétrico de potência (SEP) é representado pelo conjunto de centrais elétricas de geração, subestações, linhas de transmissão e distribuição, que são interligados eletricamente (MATIAS, 2002). A função básica do SEP é o fornecimento de energia elétrica aos grandes e pequenos consumidores, com qualidade e no instante em que for solicitada. A figura 2.1 representa a estrutura de um SEP, com a sua subdivisão em geração transmissão e distribuição.

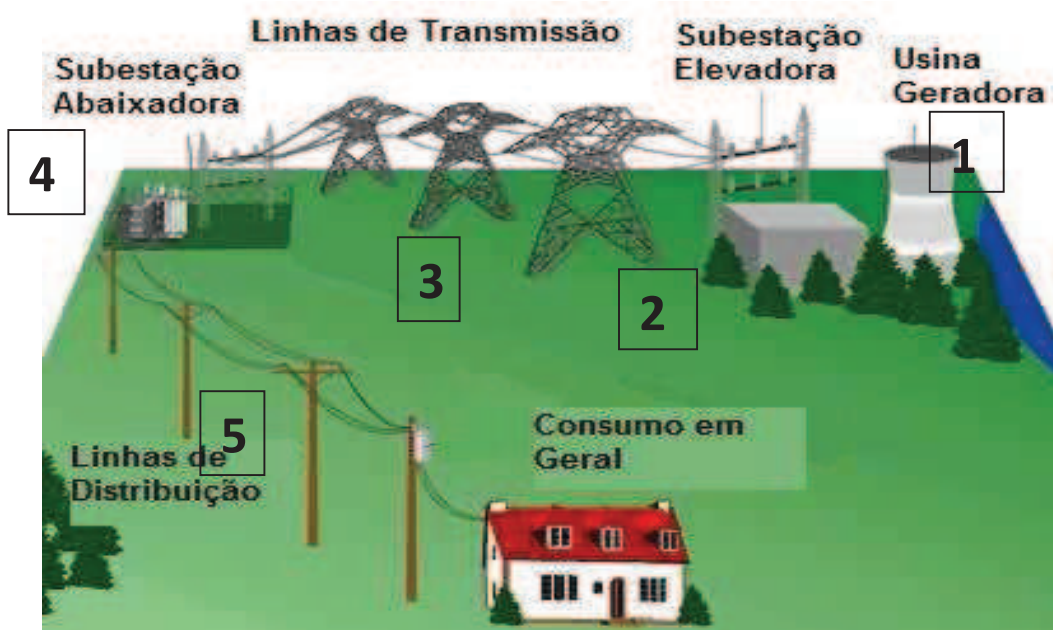


Figura 2.1: Estrutura de um Sistema Elétrico de Potência
Fonte: Vieira (2006)

Existem definições que abrangem o sistema elétrico de potência que também podem ser visualizados na figura 2.1, sendo elas:

1– Usina Geradora: A energia elétrica é gerada pelas Usinas de Geração, conversoras de alguma forma de energia (nuclear, cinética, calor, etc.) em energia elétrica. Aspectos geográficos como relevo, bacias hidrográficas, incidência solar e até mesmo políticas públicas, como isenção fiscal ou incentivos à pesquisa são determinantes no tipo e predominância na produção elétrica de cada região (SOUZA, 2008).

2 – Subestação Elevadora: Corresponde à subestação em que ocorre a transformação da tensão elétrica elevando seu valor sendo a tensão na saída maior que a tensão de entrada.

3 – Linhas de Transmissão: Na parte de transmissão, que se inicia logo após a geração, ocorre o transporte da energia elétrica das Usinas de Geração aos centros de consumo, sendo formada pelas linhas de transmissão, subestações abaixadoras, etc. O conjunto de linhas de transmissão com a tensão igual ou maior que 230 Kilo volts formam a rede básica ou sistema básico de transmissão, que corresponde a todas as linhas com tensões de no mínimo 230 Kilo Volts e no máximo 765 Kilo Volts. Essa rede básica é que realiza o transporte da energia elétrica das fontes geradoras para as subestações de distribuição e os grandes consumidores (SOUZA, 2008).

4 – Subestação Abaixadora: Corresponde à subestação em que ocorre a transformação da tensão elétrica abaixando seu valor, sendo a tensão na saída menor que a tensão de entrada.

5 – Linhas de Distribuição: Correspondem a todo o conjunto de equipamentos como cabos condutores, estruturas de sustentação, isoladores ou ferragens (acessórios) necessários para transportar a energia elétrica entre a subestação abaixadora e os consumidores finais. As linhas de distribuição são divididas em rede primária e rede secundária. Ocorrendo a distribuição da energia elétrica recebida do sistema de transmissão aos consumidores finais, que será abordada com maior especificidade no tópico a seguir (SOUZA, 2008).

2.2 Subestações Elétricas (SE)

Conforme visto na figura 2.1, um sistema elétrico de potência se inicia pela geração, sendo a eletricidade transportada pela transmissão, chegando ao cliente final pelas redes de distribuição. Nessa composição do sistema elétrico ocorre a necessidade de sempre estar trabalhando e alterando os níveis de tensões para o transporte elétrico em grandes distâncias. Essas elevações ou reduções são necessárias para viabilizar técnica e financeiramente esse transporte energético. Justamente por serem responsáveis pela modificação da tensão, as subestações possuem estrutura de alto grau de complexidade, sendo formadas por vários equipamentos que trabalham em sincronismo na obtenção das tensões pretendidas, como também possuem sistemas de proteção e de alarmes contra possíveis falhas. (PAREDES, 2002).

2.2.1 Componentes:

As subestações elétricas caracterizam-se por serem o local do sistema elétrico onde ocorre a transformação, controle e distribuição da energia elétrica. Para a realização dessas tarefas são necessários *softwares* e treinamentos dos operadores para a realização de ações coordenadas com as informações de operação e manutenção provenientes dos sistemas e equipamentos que fornecem as medições e suas proteções com seus alarmes (PAREDES, 2002).

Assim, nas subestações, o desenvolvimento das suas tarefas e operações são possibilitadas pelos componentes instalados e também pela disposição dos seus barramentos. Para cada configuração de seus barramentos existem pontos positivos e negativos, dependendo da função e viabilidade econômica para a construção da subestação. Para a sua operação, a subestação necessita de vários componentes e equipamentos em sua composição, tais como:

- Barras metálicas usadas como barramentos;
- Cabos elétricos utilizados como alimentadores de eletricidade;

- Disjuntores e chaves de seccionamento para realizar manobras, ligando ou desligando circuitos;
- Transformador de potência para modificar os níveis de tensão;
- Equipamentos de supervisão e medição como os transformadores de potencial e transformadores de corrente;
- Relés, hastes para aterramento ou para-raios usados para o sistema de proteção;
- Bancos de capacitores ou associação de reatores para realizar compensações em distorções nos sinais elétricos.

2.2.2 Classificação da subestação modelada

De acordo com alguns aspectos de projeto das subestações, tem-se uma classificação quanto à construção e a sua função.

Classificação relativa à construção

- **Subestações abrigadas ou internas:**

São as subestações construídas em um abrigo, onde o transformador e os equipamentos estão protegidos das intempéries. Normalmente, o abrigo é constituído por construção em alvenaria ao nível do solo, mas também podem ser subterrâneas, devendo haver em sua estrutura ventilação e proteção contra incêndios e o isolamento da área, que deve ser cercada. Deve-se restringir, inclusive, o acesso nesse tipo de subestação, mediante o trancamento de portões e permissão de entrada somente de pessoas autorizadas.

Pelas características apresentadas, portanto, esse tipo de subestação apresenta menores ocorrências de manutenção, por estar protegida da ação do tempo, de descargas atmosféricas e de vandalismo.

Entretanto, por ter um custo mais elevado com a construção de alvenaria e toda a parte de circulação e combate a incêndio, esse tipo de subestação é mais usada em centros urbanos e

indústrias de maior porte, também estando sujeitas à normatização e fiscalização pelas concessionárias locais (SAY, 2004).

Classificação relativa à função

• Subestação abaixadora ou de transformação:

Subestações abaixadoras transformam os níveis de tensão, mas nesse caso abaixando. Nessas subestações, seus transformadores possuem mais espiras nos enrolamentos da bobina do primário do que na bobina dos enrolamentos do secundário, resultando uma menor indução de tensão elétrica na sua saída, o que abaixa o nível de tensão. Essas subestações, por suas características, se encontram no final das linhas de transmissão ou subtransmissão, conectando a rede de transmissão à rede de distribuição, que opera com níveis de tensões menores. Também podem estar presentes em indústrias ou centros que demandam maior carga de eletricidade. Trabalham com níveis usuais de tensão de 13,8 Kilo volts e 34,5 Kilo volts (FILHO e MAMEDE, 2011).

2.2.3 Sistemas da subestação em estudo

As figura 2.2 representa a perspectiva dos sistemas da subestação com um desenho esquemático desses sistemas em estudo. O item 1 representa o sistema de entrada de alta tensão com as estruturas de entrada aérea da concessionária. Nessa entrada ocorre a medição com os equipamentos, chamados de transformadores de corrente (TC) e os transformadores de potencial (TP). Também nesse item estão presentes a proteção geral da alta tensão com chaves fusíveis, elos fusíveis, para-raios e chaves seccionadoras. Posteriormente, tem se o item 2 que representa o sistema de transformação da subestação. Tendo como equipamento principal o transformador, o qual é um equipamento elétrico estático que, por meio de indução eletromagnética, transfere energia do circuito primário para o circuito secundário mantendo a mesma frequência e, em geral, alterando os valores de tensão e corrente. A subestação em estudo possui um transformador a óleo. Sendo que a isolação a óleo possui a função de isolação

e refrigeração do transformador. Como proteção do transformador tem-se os reles, disjuntores, válvula de alívio e ventilação. No item 3 é representado o sistema dos alimentadores de saída que irão fornecer eletricidade para a indústria são constituídos por cabos elétricos com muflas nos seus terminais possuindo rede de aterramento e disjuntor para proteção dos alimentadores. Como último sistema em estudo tem-se o sistema de banco de capacitores representado no item 4 o qual possui além das células capacitivas as proteções de fusíveis e reles de proteção contra curto circuitos e sobretensões. Sendo que a função da instalação de um banco de capacitores em subestações de distribuição tem como objetivo elevar o fator de potência do sistema, atuando no desbalanceamento de fases dos alimentadores e por consequência na redução do carregamento nos transformadores da subestação e dos alimentadores de saída. (FRAGOAS, 2008).

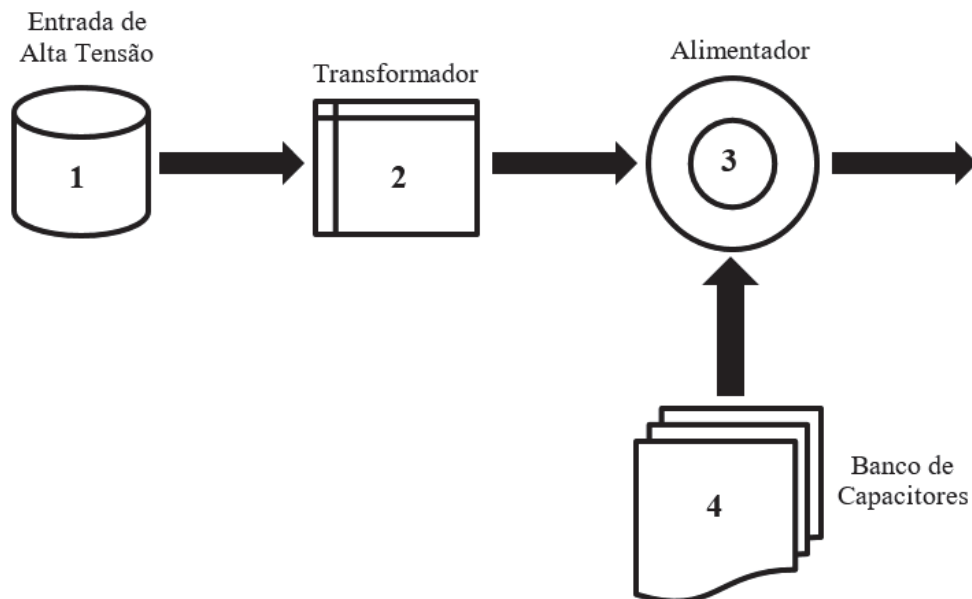


Figura 2.2: Desenho esquemático dos sistemas da subestação

2.3 Distribuição de energia elétrica

A distribuição de energia elétrica se constitui no segmento subsequente ao da transmissão, caracterizando-se pelo rebaixamento da tensão elétrica entregue pela rede de transmissão, sendo o elo entre a geração e o consumidor final. A rede elétrica de distribuição é formada pelos cabos metálicos de condução da eletricidade, pelos postes, isoladores, rede primária, rede secundária,

subestações de distribuição, ramais de serviço, medidores e transformadores de distribuição (FILHO e MAMEDE, 2011).

As subestações de distribuição tem como equipamentos relevantes o transformador elétrico, chaves-facas ou chaves-fusíveis, os seccionadores de circuito e os equipamentos de proteção (disjuntores, relés e para-raios), além dos equipamentos de medição elétrica (transformadores de corrente e de potência). As subestações são posicionadas dentro dos centros urbanos já que alimentam as redes primárias de distribuição através de alimentadores que saem das subestações. Por estarem dentro dos centros urbanos, as subestações de distribuição estão próximos aos consumidores finais e, por consequência, há uma economia de cabos e estruturas para o transporte elétrico. Entretanto, essa proximidade exige um o espaço físico considerável para a acomodação dessas subestações com todas as suas estruturas internas e estruturas externas o que abrange uma grande área. (FILHO e MAMEDE, 2011).

2.4 Falhas ou defeitos em subestações elétricas

Conforme estudos em subestações de distribuição e métodos de manutenção, a vida útil de subestações de distribuição está condicionada a diferentes fatores tais como: cargas ligadas a essas subestações acima de suas capacidades, cargas com defasagem em seu balanceamento, equipamentos com projetos fora de especificação, existência de tensões acima das permitidas tanto interna ou externamente, proteções ineficazes ou manutenções preventivas com técnicas inapropriadas (FERREIRA, 2013).

Quando há a ocorrência de um ou mais desses fatores diminui-se a vida útil dos equipamentos e sistemas em uma subestação de distribuição. Por exemplo, há um desgaste mais rápido dos sistemas envolvidos, quando os sistemas de proteção - como para-raios ou disjuntores - encontram-se fora das normas técnicas e/ou com configurações diferentes das

exigidas na proteção dos equipamentos, ou ainda quando malhas de aterramento são mal projetadas ou com erros na execução (FERREIRA, 2013).

Em análises de subestações de distribuição na Hetford Steam Boiler Inspection & Security Co, cujo estudo ocorreu em cinco anos, constatando que as subestações de distribuição falham por várias causas, tais como: (BARTLEY, 2003)

2.4.1. Descargas atmosféricas:

As condições climáticas são consideradas uma das principais causas de falhas em subestações de distribuição. Na fase de projeto deve ser verificado se a rede de distribuição que alimenta a subestação possui proteções adequadas contra descargas elétricas, sendo recomendado realizar análises na rede e na subestação, averiguando se existe coordenação nos seus isolamentos. Isto porque as redes de distribuição não possuem uma proteção contra descarga atmosférica tão eficiente como as redes de transmissão, tornando-se sujeitas a surtos elétricos provocados por descargas, podendo esses surtos danificar as subestações de distribuição.

2.4.2. Sobrecarga:

Outra causa importante e corriqueira de falhas em subestações é a ocorrência de sobrecargas, ou seja, exigir uma carga de potência superior à capacidade nominal da subestação. Mesmo que esses ciclos de carregamentos estejam previstos no projeto, essa carga excessiva contribui com o tempo para um envelhecimento mais rápido que o esperado, promovendo defeitos na isolação dos cabos e equipamentos da subestação.

2.4.3. Falhas na isolação:

Um bom sistema de isolação é essencial para a subestação desempenhar suas funções elétricas, devendo estar em bom estado e com as manutenções atualizadas. A diminuição da efetividade da isolação em cabos ou equipamentos pode ser provocada por vários fatores como quebras mecânicas, ressecamento pela temperatura ou utilizações incorretas,

caracterizando como um dos principais fatores a presença da umidade. Já no caso do óleo isolante do transformador, presente na subestação de distribuição, pode ter sua função isolante diminuída na presença de impurezas, sujeiras ou umidade. É importante, portanto, para evitar as mencionadas falhas de isolamento, seguir as normas vigentes desde a concepção quanto na execução do projeto, além das manutenções preventivas no intuito da detecção da diminuição da isolamento. Um teste importante e efetivo é o teste termográfico onde os componentes elétricos da subestação passam por uma análise termográfica com o objetivo de detectar fissuras nos seus isolamentos (MILASCH, 1984).

2.4.4. Sobretensões:

Sobretensões são caracterizadas por elevações acima das tensões nominais de trabalho da subestação e de seus equipamentos elétricos. Podem resultar de chaveamentos em cargas ligadas à subestação, compensação do fator reativo das cargas na rede de distribuição realizada por bancos de capacitores, falhas ou erro de projeto nos sistemas de regulação da tensão, escolhas mal sucedidas no nível do *tap* central no transformador de potência. Também podem ser observadas sobretensões nos equipamentos da subestação, tais como transformadores de corrente (TC), transformadores de potencial (TP), cabos, barramentos ou no próprio transformador de potência. Dependendo do tempo, do nível ou da frequência dessas sobretensões podem resultar na danificação imediata ou diminuição da vida útil desses equipamentos elétricos devido à perda da isolamento (MILASCH, 1984).

2.4.5. Umidade no transformador de potência:

A umidade pode ser detectada no interior dos equipamentos elétricos de uma subestação por vários motivos, sendo a sua ocorrência no transformador de potência o maior dano à operação da subestação. Assim, essa umidade excessiva no interior do transformador pode ocorrer por falhas ou ressecamento dos anéis de vedação, fissuras no transformador causadas pela corrosão, falta de manutenção ou por vândalos. Também pode ser encontrada

umidade excessiva no óleo isolante resultante da operação do transformador em si, sendo necessário de tempos em tempos, a análise e troca desse óleo. Essa umidade pode diminuir a vida útil do transformador com seu envelhecimento precoce, ocasionado pelo aumento da formação de bolhas no óleo isolante e aumento da condutibilidade em suas bobinas elétricas, gerando uma redução na sua estabilidade térmica e do seu isolamento elétrico prejudicando o transformador em situações de sobretensão ou sobrecarga elevando a pressão interna do transformador.

2.4.6. Curtos Circuitos:

As correntes de curto-circuito adquirem valores de grande intensidade, mas, em geral, com duração limitada a frações de segundos. São provocadas com frequência pela perda de isolamento de algum elemento energizado do sistema elétrico, em que os danos ocasionados na instalação ficam condicionados à intervenção correta dos elementos de proteção. Nesse sentido, os valores de pico no curto-circuito estão normalmente compreendidos entre 10 e 100 vezes a corrente nominal no ponto de defeito do sistema elétrico (MAMEDE, 2011).

Além das avarias provocadas pela queima de alguns componentes da instalação, as correntes de curto-circuito geram solicitações de natureza mecânica, atuando principalmente em barramentos, chaves e condutores, o que causa rompimento ou deformações nos equipamentos (MAMEDE, 2011).

2.4.7. Perdas das propriedades isolantes do óleo do transformador:

De acordo com estudos em que foram realizados testes e ensaios químicos em óleos isolantes de transformadores de potência de subestação de distribuição, constatou-se a presença de contaminantes no óleo e a presença de gases dissolvidos resultantes das operações de transformação elétrica, também podendo resultar num aumento da elevação da pressão interna (BARTLEY, 2003).

2.4.8. Falha de impedância

A falha de impedância ou alta impedância em redes de distribuição ou subestações ocorre quando existe o contato de um condutor energizado de um sistema elétrico com uma superfície de alto valor resistivo como solo, rochas, árvores, asfalto ou construções de modo geral. A qual pode ser detectada ou interrompida pelas proteções de sobrecorrente (MAMADE, 2011).

Para esse trabalho foram consideradas as características da subestação abrigada e abaixadora com as possíveis falhas em sua distribuição elétrica. Em seguida serão apresentados as características do formalismo utilizado na modelagem, bem como os modelos computacionais da subestação em estudo com suas falhas e proteções.

Capítulo 3 – Redes de Petri

3.1 Introdução

Nesse capítulo é apresentado as definições do formalismo utilizado na modelagem computacional. Será abordado a definição das redes de Petri, suas extensões bem como suas propriedades que caracterizam um modelo.

O início da fundamentação teórica das redes de Petri ocorreu com a tese de doutorado de Carl Adam Petri no ano de 1962, apresentando uma nova ferramenta de modelagem com um formalismo matemático e gráfico para descrever processos químicos (MURATA, 1989). Graficamente, as redes de Petri podem auxiliar na visualização do modelo semelhante a fluxogramas, diagramas de blocos e redes de autômatos. Já no seu formalismo matemático é possível configurar a identidade matemática de cada elemento do modelo. As redes de Petri, revelaram-se como uma importante ferramenta de modelagem matemática e gráfica aplicável para modelar o comportamento de sistemas distribuídos e simultâneos, que podem ser descrito em termos de **Estados** do sistema e mudanças nestes **Estados** (DESEL e JUHAS, 2001).

3.2 Notação Gráfica

Um dos elementos importantes do formalismo das redes de Petri é a sua notação gráfica. A notação ajuda a entender o fluxo de informações através da rede. Assim, uma rede de Petri pode ser definida como um gráfico direcionado, finito e bipartido, no sentido formal. Normalmente, sem nós isolados, sendo uma rede de Petri composta basicamente de quatro elementos principais: (PETRI, 1962):

- **Estados:** são nós passivos que se referem a condições ou estados locais de um sistema, podendo ser usados, por exemplo para representar recursos ou equipamentos, representados graficamente por um círculo ou uma elipse;
- **Transições:** são nós ativos que descrevem mudanças de estados locais no sistema,

representadas graficamente por um retângulo ou quadrado;

- **Arcos dirigidos:** especificam relações entre estados locais e ações locais, representando as relações entre **Estados** e **Transições**, representados graficamente por setas que conectam um **Estado** para uma **Transição**, nunca conectando dois nós iguais;
- **Marcações:** são elementos usados para representar informações em estados locais, representados graficamente por pontos dentro dos **Estados**, sendo produzido/consumido pelas **Transições**.

Essa convenção de símbolos facilita a compreensão das redes de Petri, uniformizando essa linguagem, sem a necessidade de legendas, constituindo-se uma vantagem das redes de Petri.

A figura 3.1 é um exemplo da representação gráfica das redes de Petri. Nela, estão representados os Estados, que definem as atividades do modelo; as Marcações que definem os recursos a serem produzidos/consumidos no modelo; os Arcos que conectam os Estados às Transições. Sendo que a quantidade de Marcações removidas ou acrescentadas depende dos pesos dos arcos representados por valores numéricos ao lado dos Arcos.

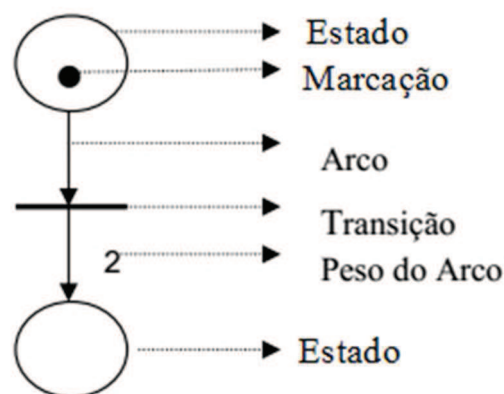


Figura 3.1: Formalismo gráfico em um rede de Petri.

Fonte: Medeiros (2007)

As propriedades dinâmicas do sistema de uma rede de Petri são regidas por uma regra de disparo, relacionando as **Transições** que podem disparar quando ativadas e, em seguida, mover as **Marcações** para os **Estados** na rede de Petri. Uma **Transição** pode disparar dependendo da

presença de **Marcações** em seus **Estados** de entrada. As **Transições** disparam ao consumir as **Marcações** de cada um dos seus **Estados** de entrada e, em seguida, produzindo novas **Marcações**, ou seja, depositando essas novas **Marcações** em cada um de seus **Estados** de saída (DESEL e JUHAS, 2001).

Na figura 3.2 é ilustrado um exemplo de modelagem da formação da molécula de água usando redes de Petri. Neste exemplo, a figura 3.2 (A) apresenta os componentes das redes de Petri (**Estado**, **Transição**, **Arco**, **Marcações**). Na figura 3.2 (B) é descrito a forma correta do formalismo da disposição das **Marcações** (somente os **Estados** possuem as **Marcações**). Na figura 3.2 (C) é descrito a forma correta de se conectar os elementos da rede de Petri, onde os **Estados** só se conectam a outros **Estados** através de uma **Transição** (não é possível conectar diretamente **Estado** com **Estado** e/ou **Transição** com **Transição**). A demonstração da regra de disparo das **Transições** quando ativadas é apresentado na figura 3.2 (D), onde a reação química da formação da molécula de água só ocorre se os **Estados** anteriores (H_2) e o (O_2) estiverem com a quantidade de **Marcações** necessárias para disparar a **Transição** formando a molécula de água (H_2O) (BLATKE 2011).

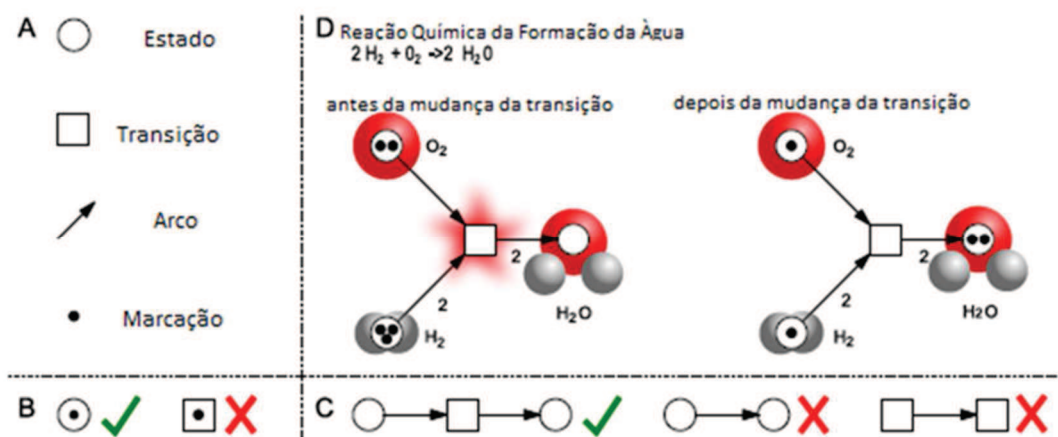


Figura 3.2: Modelo em redes Petri para a reação química da formação da molécula de água: (A) Componentes das redes de Petri (Estado, Transição, Arco, Marcação); (B) Disposição correta das Marcações; (C) Forma correta de se conectar os elementos do formalismo; (D) Demonstração da regra de disparo, adaptado de Blatke (2011)

3.3 Paradigma das Redes de Petri

O paradigma distingue as variações do formalismo que podem ser utilizado na modelagem tanto de evento discreto como de evento contínuo. Para eventos discretos, o paradigma define as Redes de Petri Qualitativas (QPN), uma classe do formalismo usada para modelar problemas independente tempo ou probabilidade, onde o comportamento do sistema é analisado em termos de causalidade e dependência sem nenhuma quantificação. Para eventos contínuos, o paradigma define as Redes de Petri Contínuas (CPN) que substitui valores discretos por valores contínuos (real) para representar concentração ao longo do tempo; Redes de Petri Estocásticas (SPN) onde uma probabilidade de disparo exponencialmente distribuída (tempo de espera) é associado às **Transições**; e Redes de Petri Híbrida (HPN) que combina as características das CPN e SPN (HEINER, 2012). Além dessas classes, foi definido por Jensen uma extensão do formalismo onde informações sobre o modelo são adicionadas em forma de “cor” (tipos de dados) definido para as **Marcações**, o que permite operações entre **Marcações** e abstração da estrutura das redes. Uma linguagem de programação funcional, chamada Standard ML é usada para manipular e testar os dados, permitindo a criação de modelos flexíveis, compactos e parametrizados (JENSEN, 1981).

A Rede de Petri e suas classes e extensões coloridas, permitem organizar o formalismo em um conjunto de módulos que compartilham as mesmas funcionalidades estruturais, porém definem especialidades diferentes: QPN - QPN^C (colorido), SPN - SPN^C (colorido), CPN - CPN^C (colorido), HPN - HPN^C (colorido). A conversão entre essas classes se dá através da extensão (discreto para o quantitativo), abstração (quantitativo para o discreto), aproximação (contínuo e estocástico para o híbrido) e agrupamento/desagrupamento de componentes no caso das extensões coloridas. Mover entre o nível colorido e não colorido muda o estilo de representação, mas não necessariamente a estrutura da rede (LIU e HEINER, 2011). A Figura 3.3 retrata esse

paradigma de estrutura no formalismo de redes de Petri, ressaltando as quatro classes e suas possíveis conversões (HEINER et al., 2012).

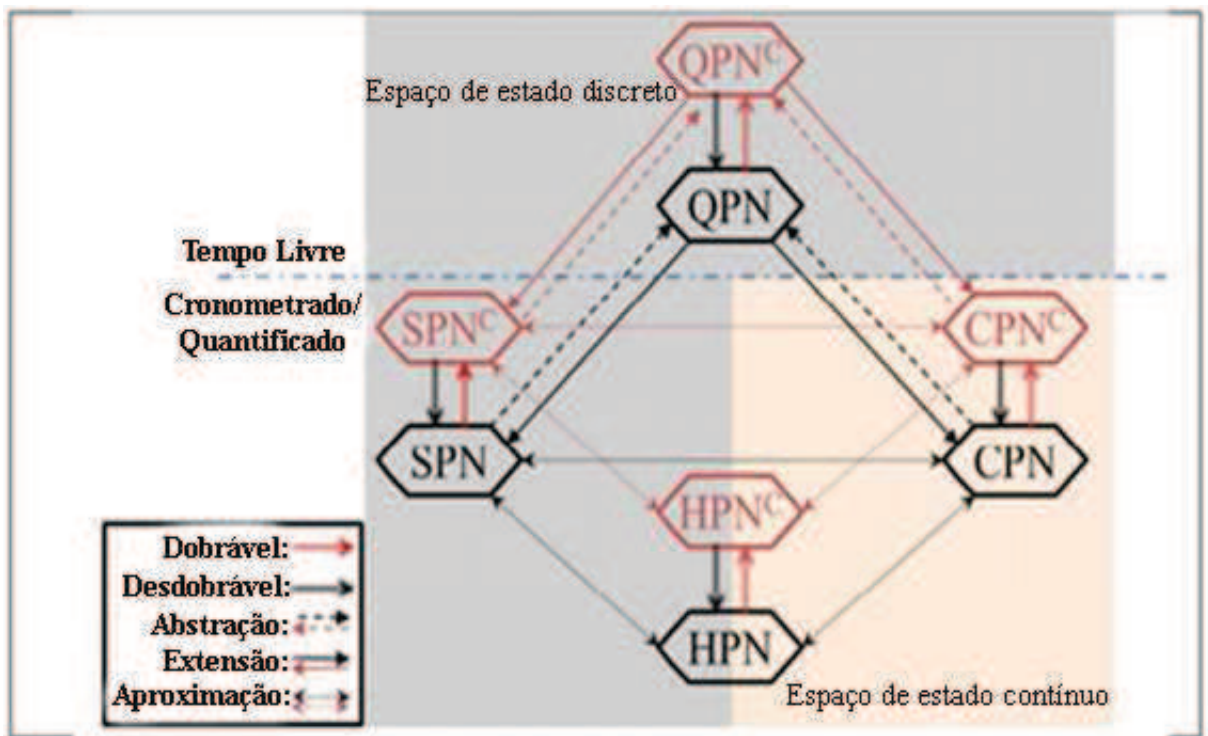


Figura 3.3: Estrutura do paradigma no formalismo das redes de Petri adaptado de Heiner et al. (2012)

Na figura 3.3 estão representadas diferentes classes de redes de Petri especializadas, como redes de Petri qualitativas (QPN), estocásticas (SPN), contínuas (CPN) ou híbridas (HPN), e suas homólogas coloridas estão disponíveis para descrever diferentes cenários e considerar diferentes abordagens dependendo dos dados presentes na modelagem. E de acordo com a estrutura apresentada na figura 3.3 todas essas classes de redes de Petri podem ser convertidas entre si. Permitindo a integração de informações qualitativas, contínuas e estocásticas em diferentes processos com diversos tipos de dados, assim facilitando a modelagem a análise e simulação desses processos (HEINER, 2009).

Redes de Petri Qualitativas (QPN): a classe padrão básica do formalismo das redes de Petri consiste em redes de Petri de **Estado/Transição** (PTNs), também chamadas de redes de Petri qualitativas (QPNs). Estas redes são discretas e não têm associação com o tempo ou a probabilidade. Possíveis comportamentos do sistema são analisados em termos de causalidades

e dependências, sem qualquer quantificação. Um modelo de rede de Petri pode ser aprimorado com **Arcos** de leitura e inibidor especiais como forma de modelagem de ativação ou inibição de atividades, respectivamente. Além disso, os recursos podem ser adicionados permitindo que submodelos se conectem em uma estrutura hierárquica (HEINER, 2011).

Redes de Petri Contínuas (CPN): em redes contínuas de Petri (CPN), os valores discretos da rede são substituídos por valores contínuos (reais) para representar valores ao longo do tempo. O disparo da **Transição** é realizado como sendo um fluxo contínuo (como, por exemplo, o modelo de funcionamento do fluxo de uma corrente elétrica passando por um disjuntor). A **Marcação** contínua é progressivamente transferida respeitando uma velocidade de disparo (HEINER, 2011).

Redes de Petri Estocásticas (SPN): nas redes de Petri Estocásticas (SPN), uma taxa de disparo exponencialmente distribuída (tempo de espera) - tipicamente dependente e especificado por uma função da taxa de disparo - está associado a cada **Transição**. As redes de Petri Estocásticas podem ser consideradas como uma rede de Petri temporizada em que os tempos têm valores estocásticos (aleatórios). Nela, um tempo de disparo (funções da taxa de disparo) está associado a cada **Transição**, especificando a quantidade de tempo que deve decorrer antes que a **Transição** possa ser disparada. Este tempo de disparo é uma variável aleatória que segue uma distribuição de probabilidade exponencial. (HEINER, 2011).

Redes de Petri Híbridas (HPN): são as que permitem uma combinação contínua e estocástica de acordo com as características do processo a ser modelado (MURA, 2008).

Redes de Petri Coloridas: são uma extensão do formalismo das rede de Petri em que informações são adicionadas sob a forma de cores (tipos de dados) atribuídos às **Marcações**, permitindo mais possibilidades de operações e estrutura. Utilizando de declarações de variáveis para manipular e testar dados, as redes de Petri coloridas fornecem uma maneira flexível de criar modelos compactos e parametrizáveis. Dentro das redes de Petri coloridas, para regular a

ocorrência de **Transições**, existem expressões de **Arco** que especificam quais **Marcações** podem fluir sobre os **Arcos**, chamadas de expressões guardas (JENSEN, 2009).

3.4 Notação Matemática Para Redes de Petri

Apenas um formalismo matemático com uma linguagem matemática exata, como o encontrado nas redes Petri, fornece clareza no método de modelagem. Segundo a sintaxe, que realiza o estudo das estruturas ou padrões formais do modo como alguma coisa é expressa ou descrita, há diferentes maneiras de especificar uma classe de redes Petri. Podendo a sintaxe especificar uma classe de todas as redes Petri geradas utilizando um determinado conjunto de regras matemáticas para as redes Petri dessa mesma classe. (DESEL; JUHAS, 2005). No apêndice F encontra-se os formalismos matemáticos das redes de Petri e seus detalhes.

3.5 Propriedades das Redes de Petri

O comportamento das redes de Petri é reflexo, não apenas dos seus formalismos gráficos e matemáticos, mas influenciado também por regras e propriedades nelas presentes. Uma regra importante é a chamada Regra de Ocorrência, na qual uma **Transição** deve estar conectada a um **Estado** por um arco e a habilitação de disparo dessa **Transição** depende da presença de **Marcações** no **Estado** que antecede essa **Transição**. Sendo que o comportamento de uma rede de Petri não está restrito a análise de apenas uma **Transição** isolada, mas aos conjuntos de **Transições** e **Estados**, que podem estar relacionados de diferentes formas. A análise do comportamento de uma rede de Petri, depende do estudo de suas propriedades comportamentais e estruturais (DESEL; JUHAS, 2005).

O primeiro passo na análise de uma rede de Petri geralmente reflete decidir propriedades comportamentais gerais, ou seja, propriedades que podem ser descritas de forma independente a partir da funcionalidade da rede sob consideração (MURATA 1989).

- Abaixo estão descritas as principais propriedades comportamentais (MURATA, 1989).

Alcançabilidade: É fundamental para o estudo da dinâmica de uma rede de Petri identificar quais os **Estados** podem ser alcançáveis em cada modelo. Em outras palavras: alcançabilidade reflete todas as **Marcações** que podem ser atingidas a partir da **Marcação** inicial M_0 . Em alguns modelos de rede de Petri é interessante realizar o estudo da alcançabilidade em trechos ou sub-redes específicas para se evitar a explosão dos **Estados** desse trecho.

Limitação ou Segurança: uma rede de Petri pode ser considerada limitada quando a quantidade de **Marcações** possíveis em cada um de seus **Estados** não ultrapassar a quantidade máxima de **Marcações** alcançáveis partindo da **Marcação** inicial M_0 . Evita-se, assim, que ocorram explosões dos **Estados**.

Vivacidade: a vivacidade de uma rede de Petri é medida nas suas **Transições**, estando relacionada à presença ou não de ocorrências que impedem o fluxo das **Marcações**, decorridas pelos disparos das **Transições**.

Reversibilidade: Assim as redes de Petri reversíveis são aquelas em que partindo de uma **Marcação** qualquer M_x se consegue alcançar ou reverter para a **Marcação** inicial M_0 .

Persistência: uma rede de Petri possui a propriedade da persistência quando, para qualquer duas **Transições** habilitadas na rede, o disparo de uma não desabilitar ou impedir o disparo da outra. Assim pode-se considerar uma rede de Petri persistente quando uma **Transição** for habilitada, permanecendo assim até o seu disparo.

- Abaixo estão descritas as principais propriedades estruturais (HEINER 2009).

Puracidade: Uma rede de Petri é pura quando não há dois nós conectados em ambas as direções (sendo excluídos dessa característica os arcos) ou seja, as **Marcações** fluem em apenas uma direção. Não sendo possível alternar a direção das **Marcações** ao longo de uma rede de Petri pura.

$$\forall x, y \in P \cup T: f(x, y) = 0 \Rightarrow f(y, x) = 0$$

Normalidade: Uma rede de Petri é considerada normal se todos os pesos dos **Arcos** são iguais a 1. Isso inclui homogeneidade à rede.

$$\forall x, y \in P \cup T : f(x, y) = 0 \Rightarrow f(x, y) = 1$$

Homogeneidade: Uma rede de Petri é considerada homogênea se todos os **Arcos** de saída de um determinado local têm a mesma multiplicidade.

$$\forall p \in P : t, t \in p \Rightarrow f(p, t) = f(p, t)$$

Multiplicidade: Uma rede de Petri é considerada com multiplicidade se para cada **Estado** na rede o mínimo das multiplicidades dos **Arcos** de entrada não é menor do que o máximo das multiplicidades dos **Arcos** de saída. Caso contrário um local de entrada causa o bloqueio da multiplicidade.

$$\forall p \in P : p = \emptyset \wedge \min \{f(t, p) \mid \forall t \in p\} \geq \max \{f(p, t) \mid \forall t \in p\}$$

Conservação: Uma rede de Petri é considerada conservadora se todas as **Transições** adicionam exatamente tantas **Marcações** aos seus **Estados** posteriores quanto a quantidade de **Marcações** dos seus **Estados** anteriores.

$$\forall t \in T : \sum P \in t . f(p, t) = \sum P \in t . f(t, p)$$

Todas essas propriedades caracterizam o modelo, e é através delas que é possível extrair informações como pontos de possíveis gargalos, interrupção e até falhas que caracterizam o problema modelado. O próximo capítulo descreve um modelo qualitativo representando uma subestação elétrica.

Capítulo 4 – Modelo Qualitativo

4.1 Introdução

Nesse capítulo é apresentado um modelo qualitativo de uma subestação elétrica utilizando redes de Petri. São discutidos os aspectos que definem a estrutura da subestação, bem como as características dos eventos de falhas. Na modelagem qualitativa são levantados os dados de cada sistema da subestação como equipamentos de proteções e possíveis falhas com foco no processo, na ação e reação dos sistemas sem quantização, sem valores. Além disso, é apresentado também uma análise qualitativa do modelo.

Sistemas elétricos são caracteristicamente complexos com muitas ligações, interconexões e equipamentos. Torna-se imprescindível a identificação destas características pertinentes aos sistemas elétricos, que no caso compõem a subestação a ser modelada. A qualidade das informações e dados, por estarem estruturados e conectados, isto faz com que influenciem no processo da modelagem. Uma abordagem de implementação com divisão em partes é importante, pois simplifica a modelagem e, ao mesmo tempo, diminui sua complexidade por se trabalhar com os sistemas mais importantes. Nesse trabalho a subestação elétrica será representada em um modelo hierárquico com dois níveis conforme figura 4.1. Sendo modelado um sistema de falhas (SDF) no nível principal onde estão representados as origens das possíveis falhas em uma estação elétrica, com os alarmes e rearmes de cada sistema modelado. Já o nível mais baixo (nível secundário) corresponde a quatro sistemas: 1) o sistema de entrada de alta tensão (SDF AT) representando as falhas de descarga atmosférica e curto circuito; 2) o sistema do transformador (SDF TR) com as falhas de sobretensão, alta pressão e alta temperatura; 3) o sistema dos alimentadores (SDF AL) com as falhas de sobrecorrente e impedância; 4) o banco de capacitores (SDF BC) com as falhas de sobretensão e curto circuito.

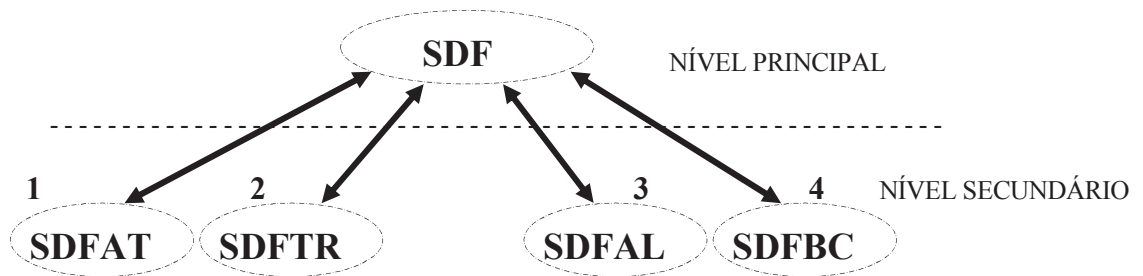


Figura 4.1: Diagrama correspondente ao modelo hierárquico do sistema de falhas na Subestação Elétrica

4.2 Softwares utilizado na modelagem e análise do modelo

No processo de modelagem foi utilizado uma ferramenta chamada *Snoopy* para realizar a modelagem e simulação da estrutura da subestação e suas respectivas falhas. Dentre outros editores de redes de Petri a ferramenta *Snoopy* possui as seguintes vantagens (HEINER, 2011):

- 1) Fornece a possibilidade da utilização de todas as classes de redes de Petri e extensões;
- 2) Em cada uma dessas classes possui animações dedicadas e/ou recursos de simulação.
- 3) Possibilita a conversão entre as diferentes classes de rede de Petri;
- 4) É um *software* gratuito;
- 5) Possui uma plataforma na qual permite que futuras extensões sejam adicionadas sem a necessidade de alterar a estrutura do modelo qualitativo;
- 6) O *Snoopy* apresenta uma plataforma compatível com ferramentas de análise, permitindo a verificação das propriedades básicas e análises estruturais das redes de Petri.

Para a análise estrutural foi utilizado o *software* de análise chamado *Charlie*. Essa é uma ferramenta para analisar redes de Petri em relação a suas propriedades estruturais e comportamentais. O analisador *Charlie* possui as seguintes vantagens (HEINER 2011):

- 1) Análise de redes de Petri de estado / transição, pelo padrão da teoria das redes de Petri;
- 2) Análise de redes de Petri estendidas (arcos de leitura / inibidor / igual) com base na construção do gráfico de acessibilidade;
- 3) Análise estrutural das propriedades estruturais;

- 4) *Software* gratuito;
- 5) Compatível com o editor de redes de Petri *Snoopy*.

4.3 Modelo Hierárquico

Para o modelo hierárquico qualitativo dois níveis foram definidos afim de diferenciar os pontos de falhas. Para esse a modelagem qualitativa, o tempo e a probabilidade não serão considerados. O modelo hierarquico não é quantificado em relação a valores absolutos, ele apenas representa as ações e consequências de uma determinada falha, com o intuito de mostrar os equipamentos e suas reações mediante a uma determinada falha.

4.3.1 Nível Principal

De acordo com a figura 4.2 o nível principal corresponde ao sistema principal de falhas (SDF). Nele os **Estados** representam os equipamentos responsáveis pela origem das possíveis falhas tais como rede elétrica de alta e baixa tensão, desgaste interno do transformador, sobrecarga na indústria e baixa isolamento nas células capacitivas. Já as **Transições** no (SDF) representam as falhas originadas nos **Estados** tais como falha de descarga atmosférica, falha de curto circuito, falha de sobretensão, falha de sobrecorrente, falha de alta pressão, falha de alta temperatura, falha de impedância e falha de curto circuito. Também são representados no (SDF) os alarmes e rearmes presentes nos sistemas do nível secundário (representados por **Estados** lógicos). Eles permitem identificar quando um alarme é acionado (mudança no seu valor lógico). As **Marcações** fluem dos **Estados** que originam as falhas e habilitam as **Transições** que representam as respectivas falhas de cada **Estado**. Essas **Transições** que correspondem as falhas no nível principal se comunicam com o nível secundário através dos *coarse places* (graficamente representada por um duplo círculo e que indicam a conexão entre dois níveis hierárquicos). No nível secundário, cada sub sistema irá neutralizar as falhas provenientes do nível principal utilizando as suas respectivas proteções modeladas.

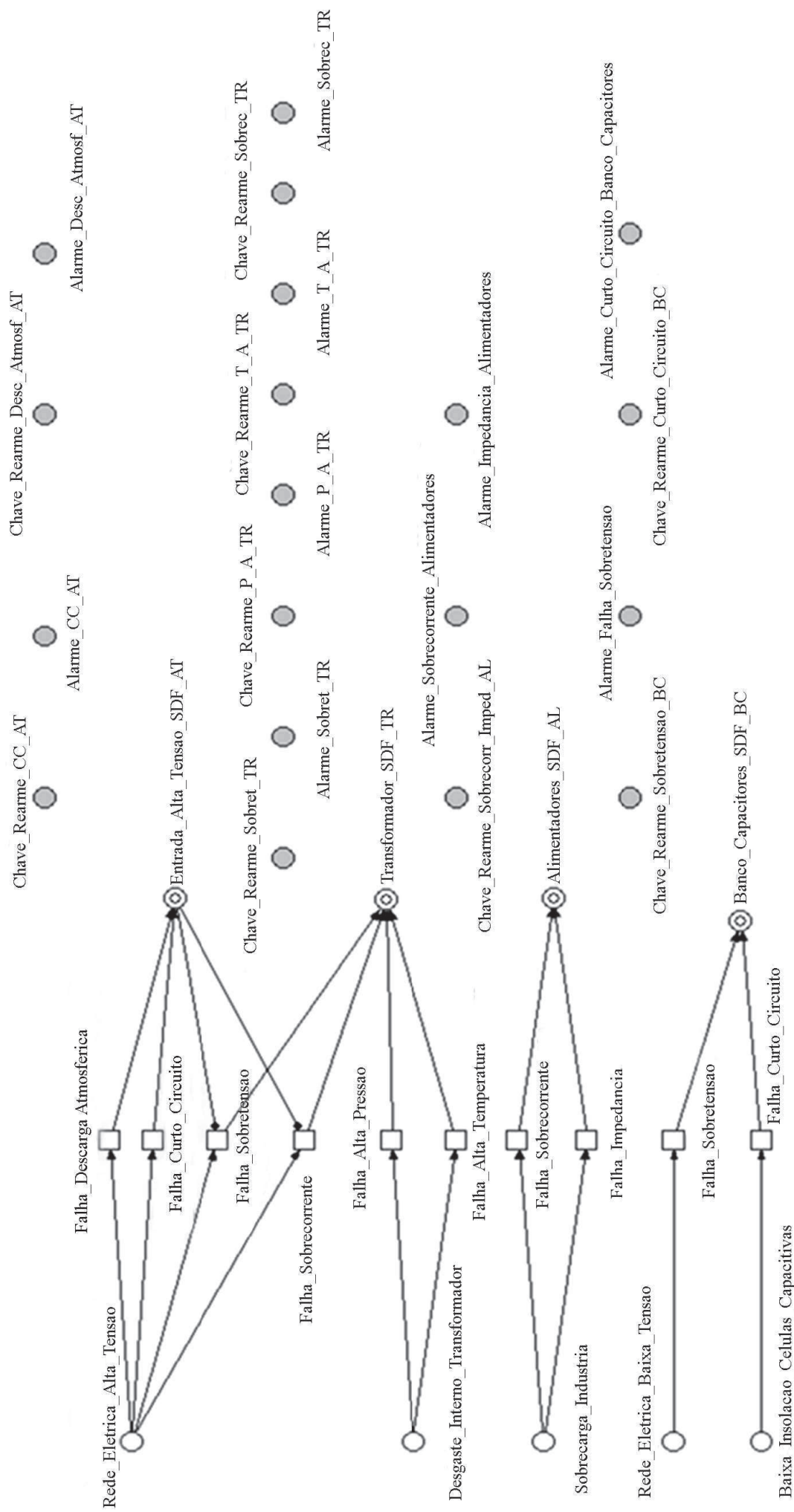


Figura 4.2: Redes de Petri representando o sistema principal de falhas (SDF)

4.3.2 Nível secundário (SDF AT)

Na modelagem do (SDF AT) são modeladas as falhas por descarga atmosférica e falha por curto circuito provenientes da rede elétrica de alta tensão. Conforme a figura 4.3 com o evento de uma descarga atmosférica no nível principal, essa descarga atmosférica se propaga pela rede elétrica. Ativando a **Transição Falha Descarga Atmosferica** do sistema de proteção (SDF AT) no nível secundário. Nele, a diferença de tensão gerada pela descarga elétrica é detectada na mufla de entrada da alta tensão representada no **Estado Mufla Entrada**, disparando a **Transição Diferença Tensão AT** fazendo que o alarme seja acionado e o para raio atue (representados respectivamente pelos **Estados Alarme Desc Atmosf AT** e **Para Raio Entrada AT**) fazendo com que essa descarga atmosférica se escoe para a Terra. Neutralizando a falha. Caso o para raio falhe, essa descarga atmosférica é transmitida ao transformador ativando a **Transição Falha Sobretensao** no (SDF TR) também no nível secundário. Quando a chave rearre (**Estado Chave Rearre Desc Atmosf AT**) é acionada pelo operador o alarme é desligado e o para raio está pronto para atuar novamente.

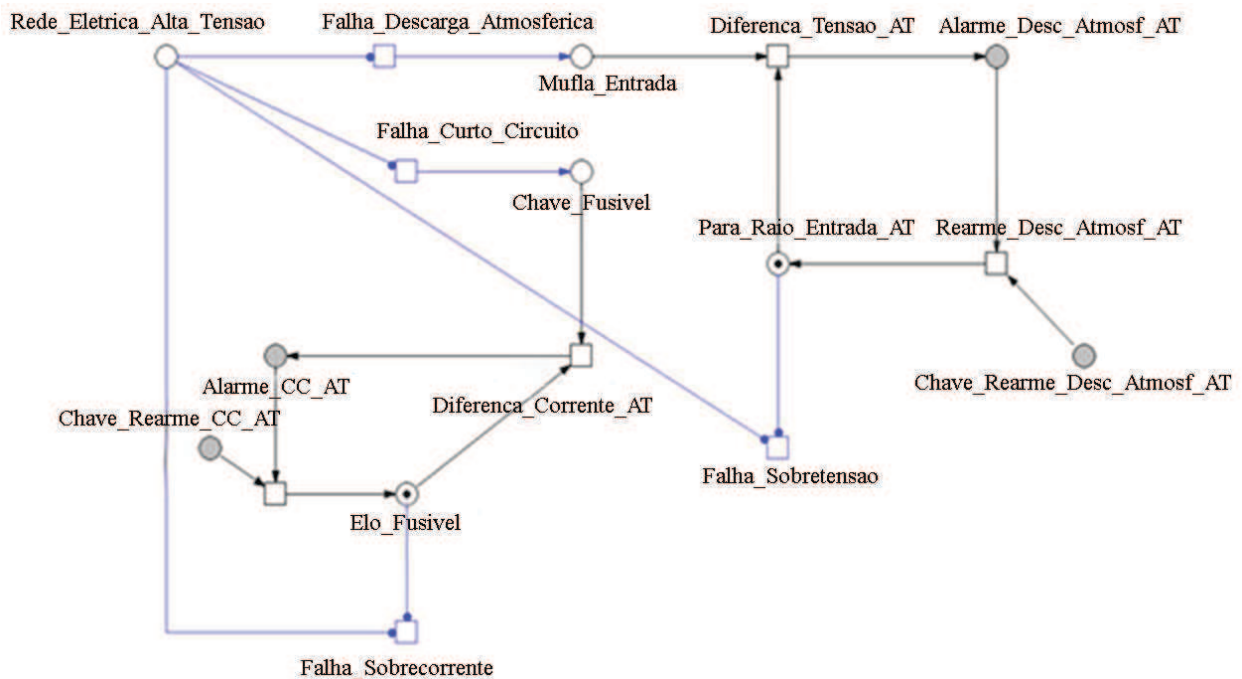


Figura 4.3: Modelo Qualitativo do (SDF AT)

Outra falha modelada na figura 4.3 é a falha causada por curto circuito proveniente da rede de alta tensão no nível principal. Representada pela **Transição Falha Curto Circuito** no nível secundário do sistema de proteção (SDF AT). Essa corrente elétrica excessiva é detectada pela chave fusível (representado pelo **Estado Chave Fusível**) cuja a diferença de corrente dispara a **Transição Diferença Corrente AT** acionando o alarme de curto circuito e fazendo com que o elo fusível atue (representados respectivamente pelos **Estados Alarme CC AT** e **Elo Fusível**) abrindo o circuito elétrico e cessando a falha. Caso o elo fusível falhe essa corrente elétrica excessiva é transmitida ao transformador ativando a **Transição Falha Sobrecorrente** no (SDF TR) também no nível secundário. Quando a chave rearme (**Estado Chave Rearme CC AT**) é acionada pelo operador o alarme é desligado e o elo fusível está pronto para atuar novamente. Mais informações desse modelo no Apêndice A.

4.3.3 Nível secundário (SDF TR)

Na modelagem do (SDF TR) são modeladas as falhas por sobretensão, sobrecorrente, pressão alta no transformador e alta temperatura do óleo isolante. Assim o modelo do (SDF TR) ficou dividido em três modelos conforme as figuras 4.4, 4.5 e 4.6.

De acordo com a figura 4.4 quando ocorre a falha do elo fusível no sistema (SDF AT) a **Transição Falha Sobrecorrente** é disparada. O transformador de corrente (representado pelo **Estado TC Transformador**) detecta essa corrente elevada que dispara a **Transição Diferença Corrente TR**. Ligando o alarme de sobrecorrente (**Estado AL Sobrecorrente TR**) e acionando o rele do transformador que atua abrindo o disjuntor (representados respectivamente pelos **Estados Rele 1 Transformador** e **Disjuntor Transformador**). Consequentemente abrindo o circuito elétrico, cessando a falha de sobrecorrente. Quando a chave rearme (**Estado Chave Rearme Sobrecorrente TR**) é acionada pelo operador o alarme é desligado e o rele 1 do transformador está pronto para atuar novamente. Mais detalhes no apêndice B.

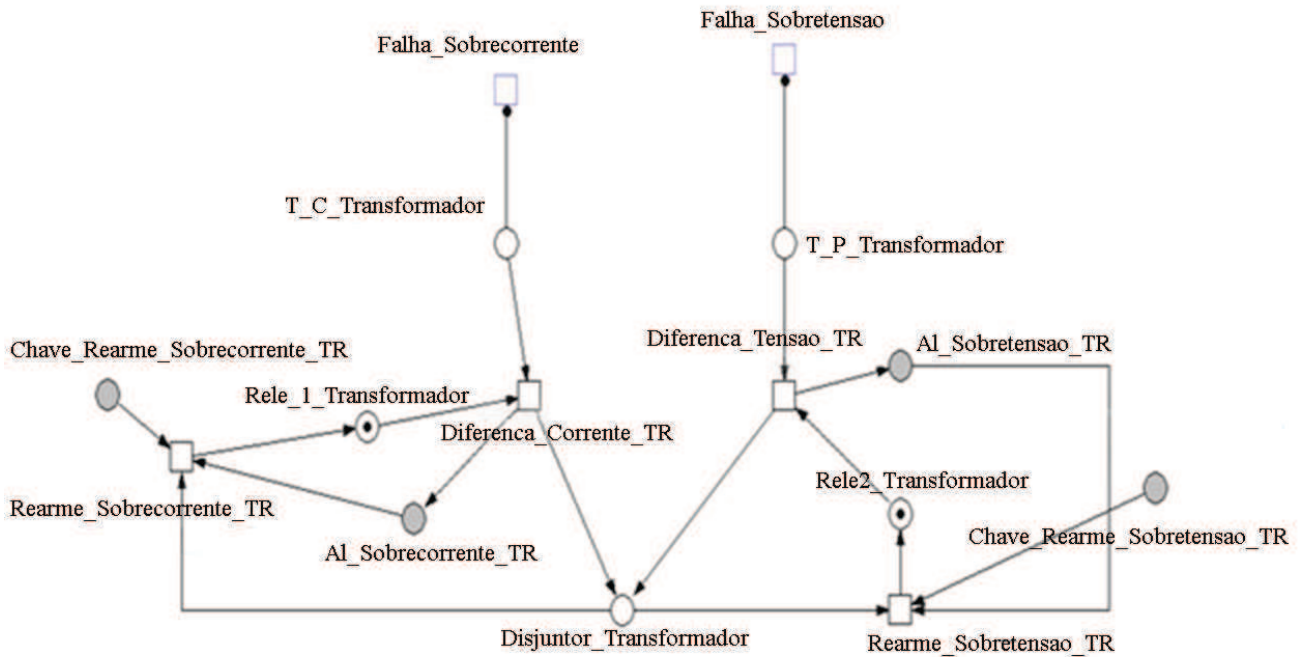


Figura 4.4: Modelo Qualitativo do (SDF TR).

Ainda com a figura 4.4 quando ocorre a falha do para raio no sistema (SDF AT) a **Transição Falha Sobrecorrente** é disparada. O transformador de potencial (representado pelo **Estado TP Transformador**) detecta essa tensão elevada que dispara a **Transição Diferenca Tensao TR**. Ligando o alarme de sobretensão (**Estado AL Sobretensao TR**) e acionando o rele do transformador que atua abrindo o disjuntor (representados respectivamente pelos **Estados Rele 2 Transformador** e **Disjuntor Transformador**). Consequentemente abrindo o circuito elétrico, cessando a falha de sobretensão. Quando a chave rearme (**Estado Chave Rearme Sobretensao TR**) é acionada pelo operador o alarme é desligado e o rele 2 do transformador está pronto para atuar novamente. Mais informações desse modelo no apêndice B. Com a figura 4.5 quando ocorre o evento desgaste interno do transformador no nível principal, esse desgaste altera as propriedades do óleo isolante do transformador podendo aumentar os gases diluídos no óleo isolante aumentando a pressão interna. Essa pressão alta é detectada pelo sensor de buchholz representado pelo **Estado Sensor Pressão Alta Transformador** do sistema de proteção (SDF TR) no nível secundário. Disparando a **Transição Falha Alta Pressão** fazendo que o alarme

de pressão alta seja acionado e o rele atue (representados respectivamente pelos **Estados Alarme P A TR** e **Rele 3 Transformador**) abrindo a válvula de respiro (**Estado Válvula Transformador**) e permitindo a saída dos gases em excesso do interior do transformador, cessando a falha de pressão alta. Quando a chave rearme (**Estado Chave Rearme P A TR**) é acionada pelo operador o alarme é desligado a válvula de respiro é fechada e o rele está pronto para atuar novamente. Mais detalhes desse modelo (SDF TR) consultar o apêndice B.

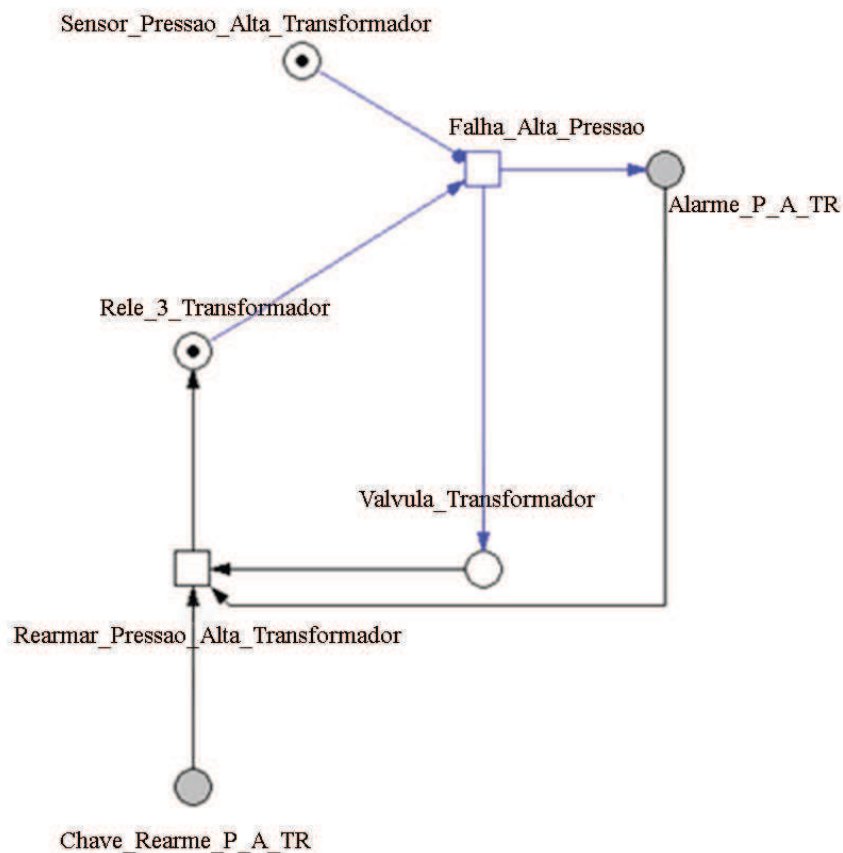


Figura 4.5: Modelo Qualitativo do (SDF TR).

Ainda devido ao evento desgaste interno do transformador no nível principal, as propriedades do óleo isolante do transformador são alteradas por esse desgaste podendo aumentar a temperatura no óleo isolante aumentando a temperatura interna. Na figura 4.6 essa temperatura alta é detectada pelo sensor de temperatura (PT 100) representado pelo **Estado Sensor Temperatura Transformador** do sistema de proteção (SDF TR) no nível secundário. Disparando a **Transição Falha Alta Temperatura** fazendo que o alarme de temperatura alta

seja acionado e o rele atue (representados respectivamente pelos Estados Alarme T A TR e Rele 4 Transformador) ligando a ventilação do transformador (Estado Ventilação Transformador) e permitindo o resfriamento do transformador, cessando a falha de temperatura alta. Quando a chave rearme (Estado Chave Rearme T A TR) é acionada pelo operador o alarme e a ventilação são desligados e o rele está pronto para atuar novamente.

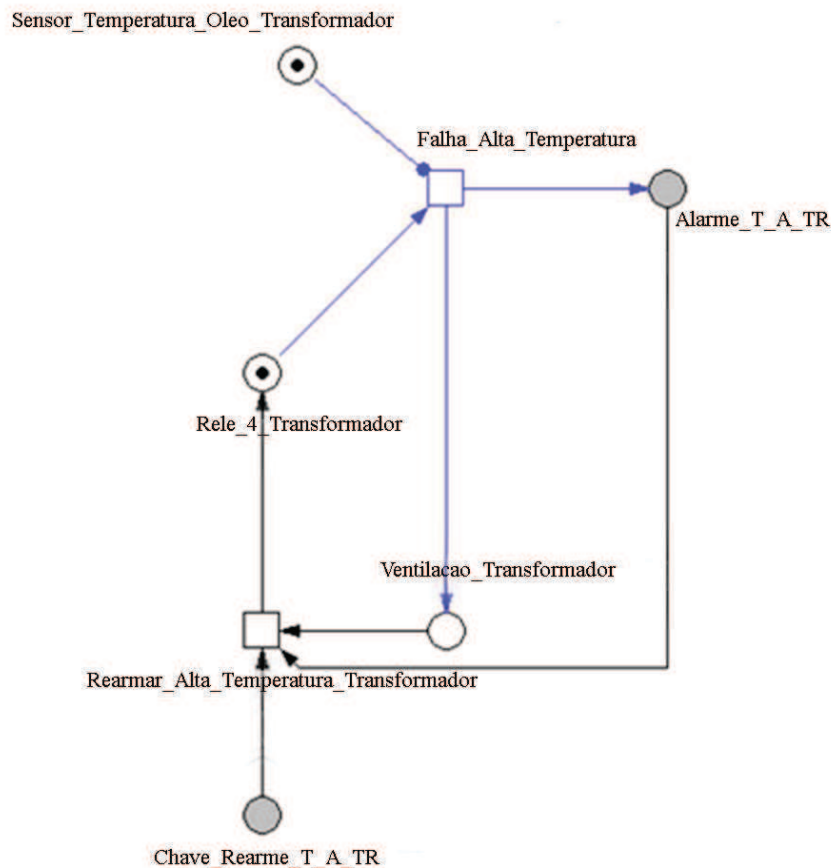


Figura 4.6: Modelo Qualitativo do (SDF TR).

4.3.4 Nível secundário (SDF AL)

Na figura 4.7 é apresentada a modelagem do (SDF AL) onde são modeladas as falhas de sobrecorrente e falha de impedância.

Com o evento sobrecarga indústria no nível principal, essa sobrecarga pode provocar uma sobrecorrente nos alimentadores de saída da subestação. Essa sobrecorrente é detectada pelo transformador de corrente dos alimentadores representado pelo Estado Transformador Corrente Alimentadores do sistema de proteção (SDF AL) no nível secundário. Disparando a

Transição Falha Sobrecorrente fazendo que o alarme de sobrecorrente seja acionado e o rele atue (representados respectivamente pelos **Estados Alarme Sobrecorrente Alimentadores** e **Rele Alimentadores**) acionando o disjuntor (**Estado Disjuntor Alimentadores**) abrindo o circuito elétrico, cessando a falha de sobrecorrente. Quando a chave rearme (**Estado Chave Rearme Sobrecorr Imped Alimentadores**) é acionada pelo operador o alarme é desligado o disjuntor é fechado e o rele está pronto para atuar novamente.

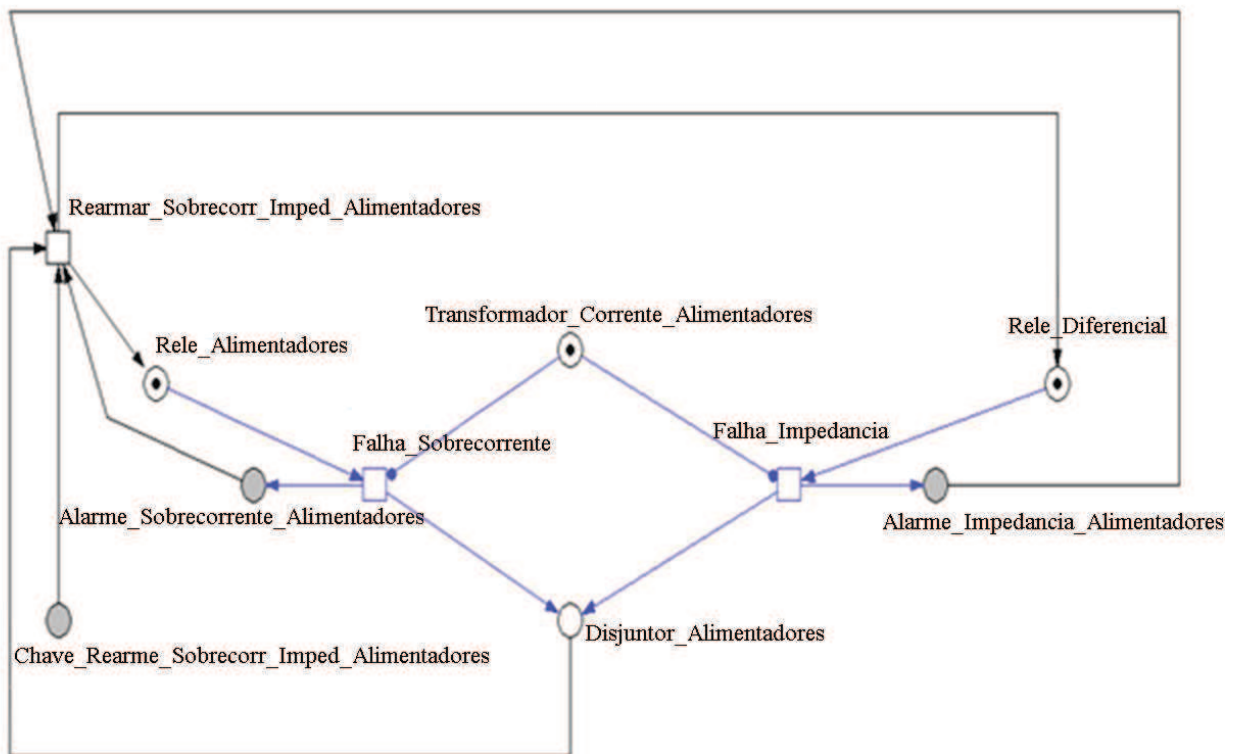


Figura 4.7: Modelo Qualitativo SDF (AL).

Ainda com a figura 4.7 com o evento sobrecarga indústria no nível principal, essa sobrecarga pode provocar também uma falha de impedância nos alimentadores de saída da subestação caso encontre obstáculos com alta impedância. Essa impedância é detectada pelo transformador de corrente dos alimentadores representado pelo **Estado Transformador Corrente Alimentadores** do sistema de proteção (SDF AL) no nível secundário. Disparando a **Transição Falha Impedancia** fazendo que o alarme de impedância seja acionado e o rele diferencial atue (representados respectivamente pelos **Estados Alarme Impedancia Alimentadores** e **Rele**

Diferencial) acionando o disjuntor (**Estado Disjuntor Alimentadores**) abrindo o circuito elétrico, cessando a falha de impedância. Quando a chave rearme (**Estado Chave Rearme Sobrecorr Imped Alimentadores**) é acionada pelo operador o alarme é desligado o disjuntor é fechado e o rele está pronto para atuar novamente. Mais detalhes desse modelo no apêndice C.

4.3.5 Nível secundário (SDF BC)

Na modelagem do (SDF BC) são modeladas as falhas por curto circuito e falha por sobretensão. Assim o modelo do sistema (SDF BC) ficou dividido em dois modelos conforme a figura 4.8 e 4.9. Com o evento baixa isolamento das células capacitivas no nível principal, esse nível baixo de isolamento entre elas pode provocar curto circuitos no banco de capacitores. Essa sobrecorrente é detectada pelo transformador de corrente do banco de capacitores representado pelo **Estado Transformador Corrente Banco Capacitores** do sistema de proteção (SDF BC) no nível secundário. Disparando a **Transição Falha Curto Circuito** fazendo que o alarme de curto circuito seja acionado e o fusível atue (representados respectivamente pelos **Estados Alarme Curto Circuito Banco Capacitores** e **Fusivel Banco Capacitores**) abrindo o circuito elétrico, cessando a falha de curto circuito. Quando a chave rearme (**Estado Chave Rearme Curto Circuito Banco Capacitores**) é acionada pelo operador o alarme é o fusível está pronto para atuar novamente. Conforme figura 4.8. Mais detalhes encontra se no apêndice D.

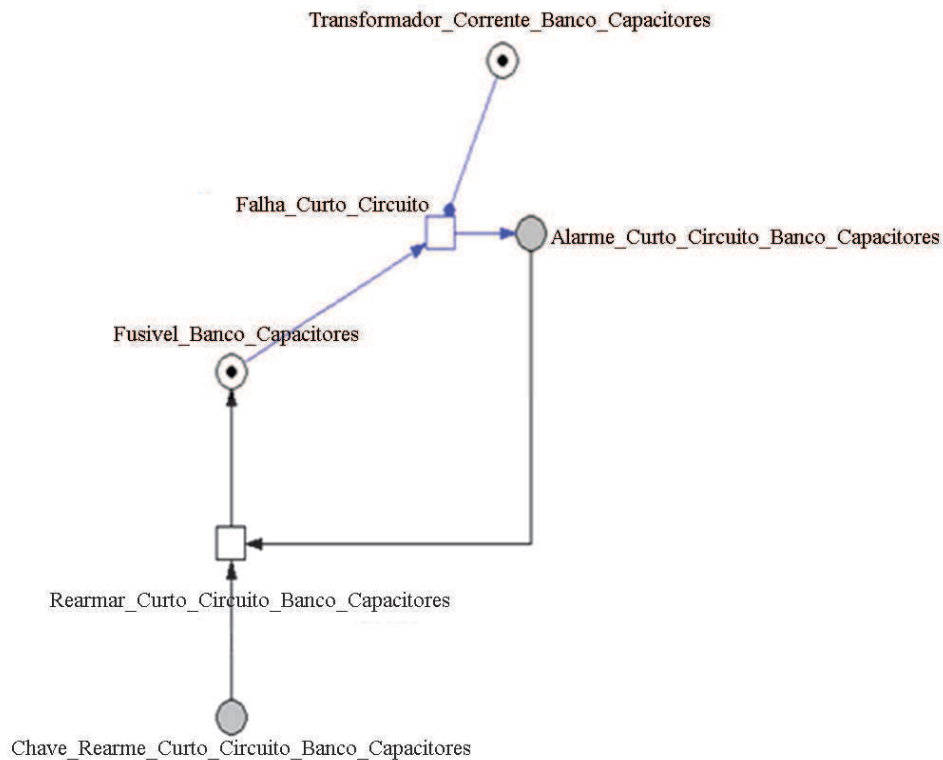
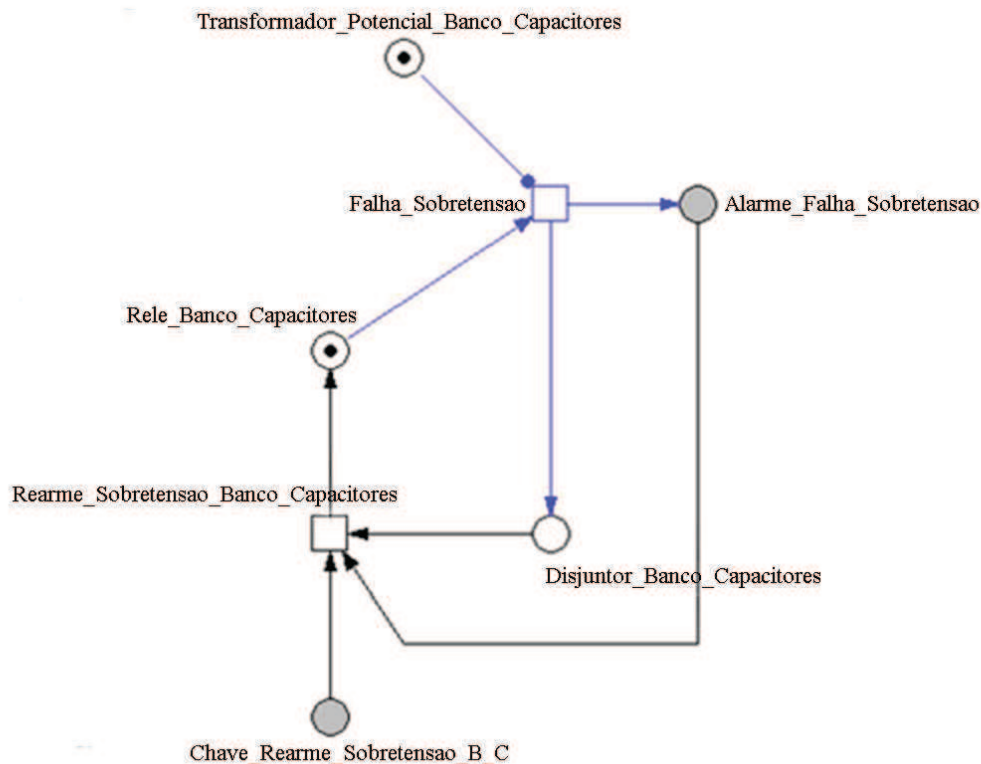


Figura 4.8: Modelo Qualitativo SDF (BC).

Conforme figura 4.9 com o evento rede elétrica baixa tensão no nível principal, essa rede elétrica pode apresentar variações de tensão ou surtos de tensão que podem provocar uma sobretensão no banco de capacitores. Essa sobretensão é detectada pelo transformador de potencial do banco de capacitores representado pelo **Estado Transformador Potencial Banco Capacitores** do sistema de proteção (SDF BC) no nível secundário. Disparando a **Transição Falha Sobretensao** fazendo que o alarme de sobretensão seja acionado e o rele atue (representados respectivamente pelos **Estados Alarme Falha Sobretensao** e **Rele Banco Capacitores**) acionando o disjuntor (**Estado Disjuntor Banco Capacitores**) abrindo o circuito elétrico, cessando a falha de sobretensão. Quando a chave rearme (**Estado Chave Rearme Sobretensao BC**) é acionada pelo operador o alarme é desligado o disjuntor é fechado e o rele está pronto para atuar novamente. Mais informações no apêndice D.



4.9: Modelo Qualitativo SDF (BC).

4.4 Análise Estrutural

Propriedades estruturais do modelo hierárquico

Utilizando o *software* de análise de redes de Petri *Charlie* foram apresentadas as seguintes propriedades estruturais para o modelo hierárquico:

- Ordinária (ORD) por possuir todos os pesos de seus arcos igual a 1.
- Homogênea (HOM) pois todos os **Arcos** de saída de um determinado local tem a mesma multiplicidade. As propriedades (ORD) e (HOM) se complementam no modelo hierárquico pois é um modelo qualitativo onde o intuito não é quantificar e sim mostrar as estruturas presentes nos sistemas da subestação em questão. Numa análise elétrica essas duas características indicam que não existe a geração de sinais elétricos além daqueles inerentes aos processos dos sistemas da subestação.
- Não possui **Transição** de entrada (FT0) ou seja na rede de Petri analisada não existem **Transições** sem um **Estado** anterior ligado a esta **Transição**.

- A rede de Petri em análise também não possui **Transição** de entrada (PF0) ou seja todos os **Estados** possuem uma **Transição** posterior ligada a esse **Estado**. Essas propriedades (FT0) e (PF0) juntas se complementam no sentido de que toda ação no modelo é controlada por um **Estado** ou seja não existem ações aleatórias ou indeterminadas ocorrendo o controle de tudo que acontece no modelo. Numa análise elétrica é como se todos os equipamentos atuassem de forma bem definida com controle de operação e sem equipamentos isolados ou sem uma função específica.
- Classe da rede de Petri (NC) esta propriedade mostra a qual classe rede de Petri pertence. Nesse modelo hierárquico uma rede de Petri estendida simples (nES). Por possuir funções estendidas como **Arcos** de leitura e **Arcos** de inibição além de se utilizar os coarses places.
- Armadilhas: Em termos de redes de Petri, uma armadilha é uma sub-rede que pega as marcações e retém pelo menos uma delas. O número de **Marcações** em uma armadilha pode diminuir, mas nunca se torna zero. No modelo hierárquico em análise não foram encontradas sub redes com armadilhas.
- Sifões: Em redes de Petri, um sifão se refere a uma sub-rede que libera todas as suas marcações. No modelo em análise não se encontra a presença de um sifão pois não existe uma sub rede que consumiu ou liberou todas suas **Marcações**.

Analisando a estrutura e o comportamento do modelo descrito nesse capítulo, é possível referenciar o mesmo ao funcionamento da subestação coerente com o real, guardada as devidas proporções de abstração ao qual o modelo foi considerado. No próximo capítulo será apresentado uma extensão desse modelo, no caso considerando propriedades quantitativas, bem como possíveis casos/cenários analisados.

Capítulo 5 – Modelo Quantitativo

5.1 Introdução

A modelagem Quantitativa, corresponde a representar um sistema utilizando valores numéricos (quantificáveis) como dados representativos para o modelo. Com o intuito de realizar a simulação identificando possíveis situações e cenários onde o modelo quantitativo possa representar o sistema real. Para isso, na figura 5.1 foi considerado quantitativamente o modelo de falha de descarga atmosférica e curto-circuito na entrada de alta tensão e a sua influência na falha de sobretensão e sobrecorrente no transformador. Por existir eventos aleatórios foram escolhidas as redes de Petri estocásticas (SPN) para essa modelagem.

Na Figura 5.1 é representado o modelo quantitativo em rede de Petri estocásticas (SPN):

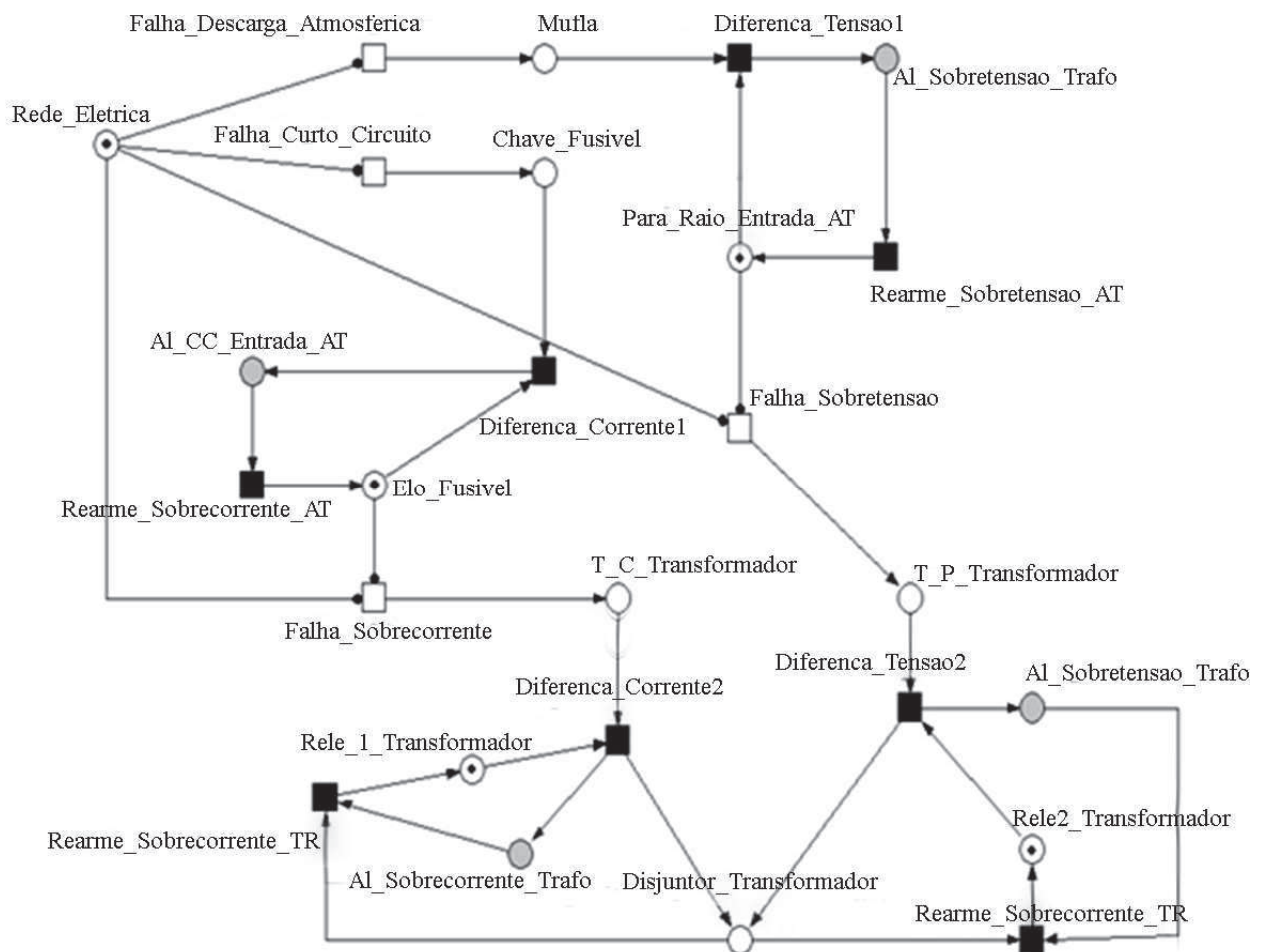


Figura 5.1: Modelo Quantitativo

5.2 Coleta e Análise de Dados

Para a quantificação do modelo foram coletados dados de 2014, 2015, 2016 e 2017 da subestação elétrica em estudo que está situada na região do Município de Porangatu no Estado de Goiás. A Tabela 5.1 apresenta as informações coletadas às falhas por descargas atmosféricas. Esses dados foram coletados entre os períodos de 2014 a 2017 e fornecidos pelo engenheiro projetista, do setor de manutenção da subestação e a Companhia Elétrica do Estado de Goiás, responsável por gerir a região. A Tabela 5.1 diz respeito às descargas atmosféricas verificadas pela rede de alta tensão, de 2014 a 2017 detectadas na subestação em estudo. De acordo com a Companhia Energética de Goiás, há seccionamentos das redes de distribuição com a instalação de chaves fusíveis de seis em seis quilômetros, em locais de fácil acesso para a operação. Dessa forma, as descargas atmosféricas da Tabela 5.1 podem ter ocorrido em algum ponto ao longo dos seis quilômetros da rede.

Tabela 5.1: Descargas atmosféricas por ano ocorridas na rede elétrica da subestação.

2014	2015	2016	2017
10	12	09	11

Por sua vez, a Tabela 5.2 concerne às falhas do elo fusível, de 2014 a 2017. Conforme a (NTC 66), tal elo é composto por um elemento fusível fabricado com liga de estanho ou outro material condutor que, quando circula uma corrente acima da corrente nominal (sobrecorrente), se funde, interrompendo o circuito elétrico – ele deve ser substituído após cada operação de sobrecorrente. O elo fusível considerado em nosso modelo contém as especificações semelhantes ao do elo fusível de 40 K (possui como corrente nominal máxima 40 amperes) instalado na subestação em estudo.

Tabela 5.2: Falhas do elo fusível da subestação.

2014	2015	2016	2017
02	01	01	02

A Tabela 5.3 se refere à quantidade dos curtos-circuitos provenientes da rede de alta tensão da concessionária nos anos de 2014 a 2017. As correntes de curto-circuito adquirem valores de grande intensidade, mas, em geral, com duração limitada a frações de segundos. (MAMEDE, 2011).

Tabela 5.3: Curtos-circuitos por ano ocorridos na rede elétrica da subestação.

2014	2015	2016	2017
15	13	11	09

A Tabela 5.4 se relaciona às falhas do para-raios, de 2014 a 2017. Segundo a NTC 13, o para-raios é um dispositivo de proteção projetado para limitar sobretensões a níveis aceitáveis, sem ocasionar interrupções do sistema. O para raio considerado em nosso modelo contém as especificações semelhantes ao para raio de 13,8 Kilo Volts instalado na subestação em estudo.

Tabela 5.4: Falhas do para-raios da subestação.

2014	2015	2016	2017
03	02	02	01

5.3 Simulação

A plataforma *Snoopy* proporciona um ambiente de simulação de modelos eventos estocásticos. Nesse ambiente, é possível definir as marcações iniciais para os **Estados**, as taxas das funções (probabilidades dos eventos) associadas às transições estocásticas. Além disso é possível especificar o intervalo de tempo de cada simulação e a quantidade de repetições, cujo o resultado é determinado pela média de valores sobre todas as repetições (considerando que são eventos estocásticos). Os cenários de simulação foram baseadas num tempo de 365 dias.

O modelo quantitativo apresenta quatro **Transições** estocásticas: 1) **Transição** de falha por descarga atmosférica 2) **Transição** de falha de sobretensão 3) **Transição** de falha de curto circuito 4) **Transição** de falha de sobrecorrente. Para o cálculo das taxas estocásticas dessas **Transições** do modelo quantitativo, foram utilizados os dados das tabelas 5.1, 5.2, 5.3 e 5.4 e

as variações em cada cenário de simulação. A seguir são discutidos os cenários de simulação e as suas respectivas taxas de ocorrência (probabilidade de falha).

5.3.1 Cenário 1

O primeiro cenário foi realizado com os dados coletados da subestação (tabelas 5.1, 5.2, 5.3 e 5.4), constituindo-se no Caso Base da simulação.

Nessa primeira simulação, considerou-se para o cálculo da taxa da **Transição** de falha de descarga atmosférica do modelo quantitativo o valor de descargas atmosféricas fornecido pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE 2018) que é de 2,17 por km² ao ano no município de Porangatu localidade da subestação, além do fato de a rede de alta tensão possuir seccionamento de seis em seis quilômetros de distância. Assim, ao calcular a taxa da **Transição** (2,17 x 6), notaram-se 13,02 descargas atmosféricas por km² ao ano. Para o valor da taxa estocástica em dias, dividiu-se o resultado por 365, obtendo-se 0,0356.

O cálculo da taxa da segunda **Transição** de falha de sobrecorrente, foi feita por uma média das falhas do elo fusível, de 2014 a 2017 (valores presentes na Tabela 5.2), resultando numa média de 1,5 falhas por ano. Para o valor da taxa estocástica, esse índice foi dividido por 365 dias, obtendo-se 0,0041.

Já na terceira **Transição** presente no modelo, a **Transição** de curto-circuito foi calculada pela média da Tabela 5.3, com os dados fornecidos dos curtos-circuitos ocorridos de 2014 a 2017. Somados, eles totalizam 48. Sendo 15 curtos circuitos no ano de 2014, 13 curtos circuitos no ano de 2015, 11 curtos circuitos no ano de 2016 e 9 curtos circuitos no ano de 2017, com média de 12 curtos-circuitos ao ano. Para se obter a taxa estocástica em dias, o valor da média (12) foi dividido por 365, obtendo-se 0,0328.

E a quarta e última **Transição** de falha de sobretensão foi calculada sobre a probabilidade de falha do para-raios. Nesse sentido, foram utilizados os dados da Tabela 5.4. Com um total de oito falhas em quatro anos, considerou-se a média de duas ocorrências por ano, encontrando o

valor da taxa estocástica em dias de 0,0054. Com isso, foi realizada a simulação 1, constante na Figura 5.2. No eixo x estão representados os dias de um ano, no eixo y estão representados as ocorrências de falhas ao longo desse ano. Assim para o Cenário 1 (Caso Base) tem se:

- Taxa da **Transição** de falha de descarga atmosférica: 0,0356;
- Taxa da **Transição** de falha de sobrecorrente: 0,0041;
- Taxa da **Transição** de curto-circuito: 0,0328;
- Taxa da **Transição** de falha de sobretensão: 0,0054.

Sendo que na figura 5.2 são observados 11 disparos da **Transição** de falha de descarga atmosférica (rearme sobretensão AT); 02 disparos da **Transição** de falha de sobretensão, que indica quantas falhas ocorreram no para-raios (rearme sobretensão TR); 14 disparos da **Transição** de falha de curto-circuito, referente à quantidade de falhas de curto-circuito no modelo quantitativo (rearme sobrecorrente AT); e 02 disparos da **Transição** de falha de sobrecorrente, relacionada ao número de falhas do elo fusível (rearme sobrecorrente TR).

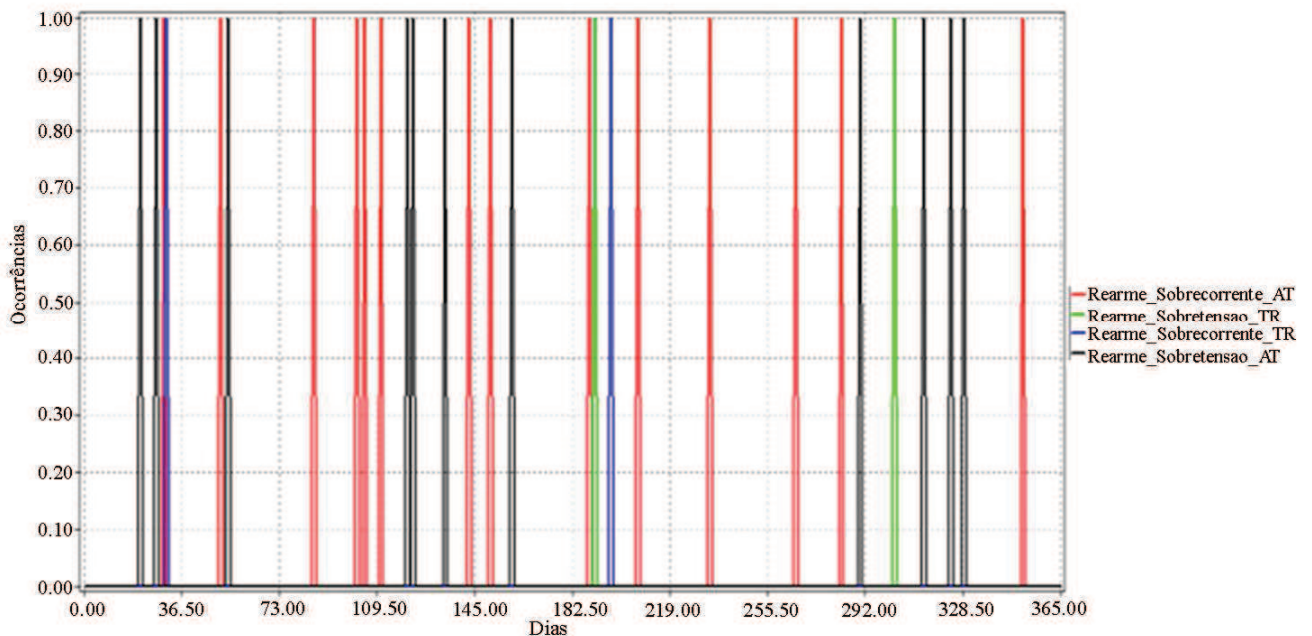


Figura 5.2: Cenário 1.

Ao comparar os índices da simulação no cenário 1 (Caso Base) com os valores reais coletados na Tabela 5.1, observa-se um valor médio de 10,5 descargas atmosféricas por ano. Com a simulação do cenário 1, houve 11 disparos da **Transição** de falha de descarga atmosférica, valor próximo do real. Já na Tabela 5.2 é observada uma média de 1,5 falha do elo fusível por ano, com a simulação 1, ocorreram 02 falhas do elo fusível valor também próximo ao real. Os dados da Tabela 5.3 revelam a quantidade de curtos-circuitos na entrada de alta tensão da subestação analisada, com média anual de 12 falhas; na Figura 5.5 são observadas 14 falhas de curtos-circuitos; e na Tabela 5.4, há 02 falhas do para-raios por ano esse valor também foi verificado na simulação ocorrendo 02 falhas.

5.3.2 Cenário 2

Para esse cenário de melhoria do sistema, ressaltou-se uma mudança no seccionamento da rede de alta tensão (de seis em seis quilômetros para o de quatro em quatro quilômetros). Essa modificação visa diminuir o comprimento da rede de alta tensão, o que minimiza a probabilidade de queda de raios ao longo da rede.

Para esse cenário será mantida a incidência de descargas atmosféricas fornecida pelo INPE, de 2,17 descargas por km² ao ano (município de Porangatu) cidade em que está instalada a subestação. Assim, a taxa da **Transição** de falha de descarga atmosférica foi calculada por $2,17 \times 4$, obtendo-se 8,68 descargas atmosféricas por km² ao ano, ao passo que, em relação à taxa estocástica em dias, dividiu-se o resultado por 365, para se chegar ao valor de 0,0237 na **Transição**, as outras taxas continuaram inalteradas em comparação ao cenário 1. Com esses valores foi realizada a simulação do cenário 2, como pode ser verificado na Figura 5.3, no eixo x estão representados os dias de um ano, no eixo y estão representados as ocorrências de falhas ao longo desse ano. Assim para o Cenário 2 tem se:

- Taxa da **Transição** de falha de descarga atmosférica: 0,0237;
- Taxa da **Transição** de falha de sobrecorrente: 0,0041;

- Taxa da **Transição** de curto-circuito: 0,0328;
- Taxa da **Transição** de falha de sobretensão: 0,0054.

Na figura 5.3, pela modificação das distâncias do seccionamento da rede de alta tensão, foram observados 08 disparos da **Transição** de falha de descarga atmosférica (rearme sobretensão AT); 02 disparos da **Transição** de falha de sobretensão (rearme sobretensão TR); 14 disparos da **Transição** de falha de curto-circuito (rearme sobrecorrente AT); e 01 disparo da **Transição** de falha de sobrecorrente (rearme sobrecorrente TR).

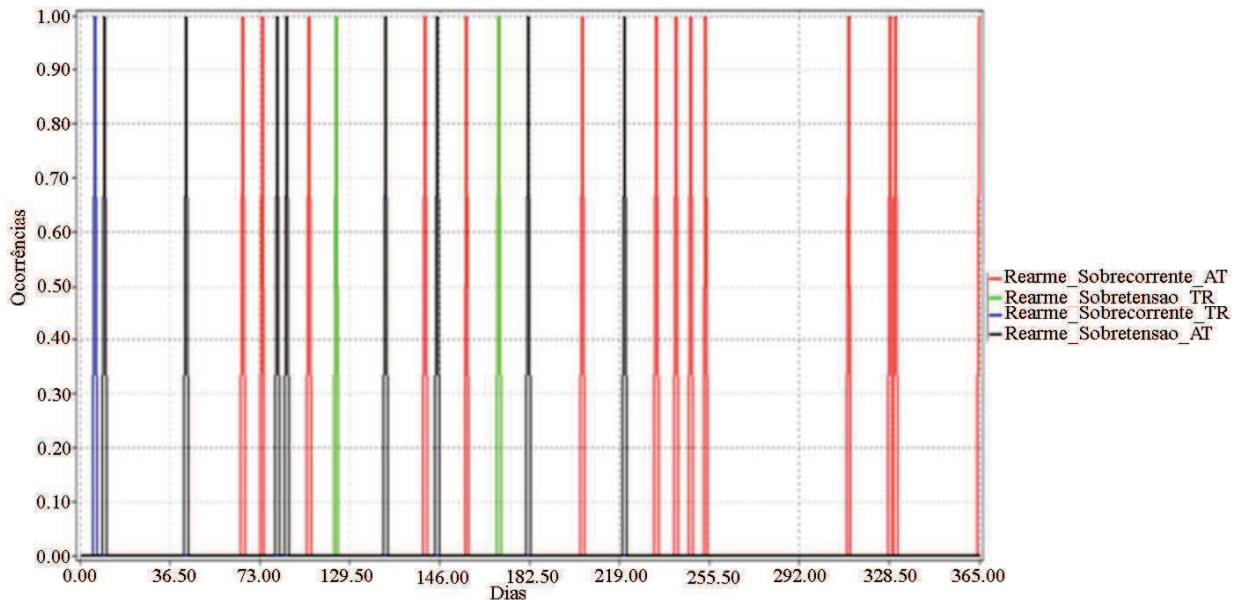


Figura 5.3: Cenário 2.

Vantagens da melhoria indicada no cenário 2:

- Redução de índices operacionais por minimização das falhas de descarga atmosférica;
- Maior satisfação do consumidor pela diminuição das interrupções de energia elétrica;
- Com uma menor distância no seccionamento, acarreta em uma menor quantidade de consumidores desligados no momento de uma falta;
- Maior possibilidade de manobras para a concessionária elétrica.

Desvantagens da melhoria indicada no cenário 2:

- Gasto com materiais em maior proporção;
- Aumento do número de pontos de manutenção onde o custo de manutenção de uma rede primária com vários seccionamentos, é mais elevado, devido a multiplicidade dos equipamentos de proteção e manobra que deverão ser instalados na rede;
- O tempo de manobra das chaves de seccionamento influi negativamente no tempo de restauração do sistema;
- Necessidade da autorização da concessionária para realizar a melhoria.

5.3.3 Cenário 3

Nesse cenário foi salientada a redundância contra a falha de um equipamento. Sendo considerado dois para raios na entrada de Alta Tensão da referida subestação. Com esse recurso se um para raio falhar o outro atuará sem prejuízo na proteção contra sobretensão e sem deixar que por falha do equipamento a falha de sobretensão chegue ao transformador. Para esse cenário serão mantidas as taxas estocásticas do cenário 1 (Caso Base). Para esse cenário de simulação será adotado que com a redundância inexisterão as falhas no para raio. Pois quando um para raio falhar o outro atuará impedindo que a falha de sobretensão chegue ao transformador. E quando um dos dois para raios falhar a equipe de manutenção realizará a troca do mesmo. Assim a única taxa que sofrerá modificação será a taxa estocástica da falha de sobretensão. Com esses valores foi realizada a simulação do cenário 3, como pode ser verificado na Figura 5.4, no eixo x estão representados os dias de um ano, no eixo y. Assim para o Cenário 3 tem se:

- Taxa da **Transição** de falha de descarga atmosférica: 0,0356;
- Taxa da **Transição** de falha de sobrecorrente: 0,0041;
- Taxa da **Transição** de curto-circuito: 0,0328;
- Taxa da **Transição** de falha de sobretensão: 0,0.

Na figura 5.4, com a redundância dos para raios, foram obtidos 10 disparos da Transição de falha de descarga atmosférica (rearme sobretensão AT); 15 disparos da Transição de falha de curto-circuito (rearme sobrecorrente AT); e 02 disparos da Transição de falha de sobrecorrente (rearme sobrecorrente TR), 00 disparo da Transição de falha de sobretensão (rearme sobretensão TR).

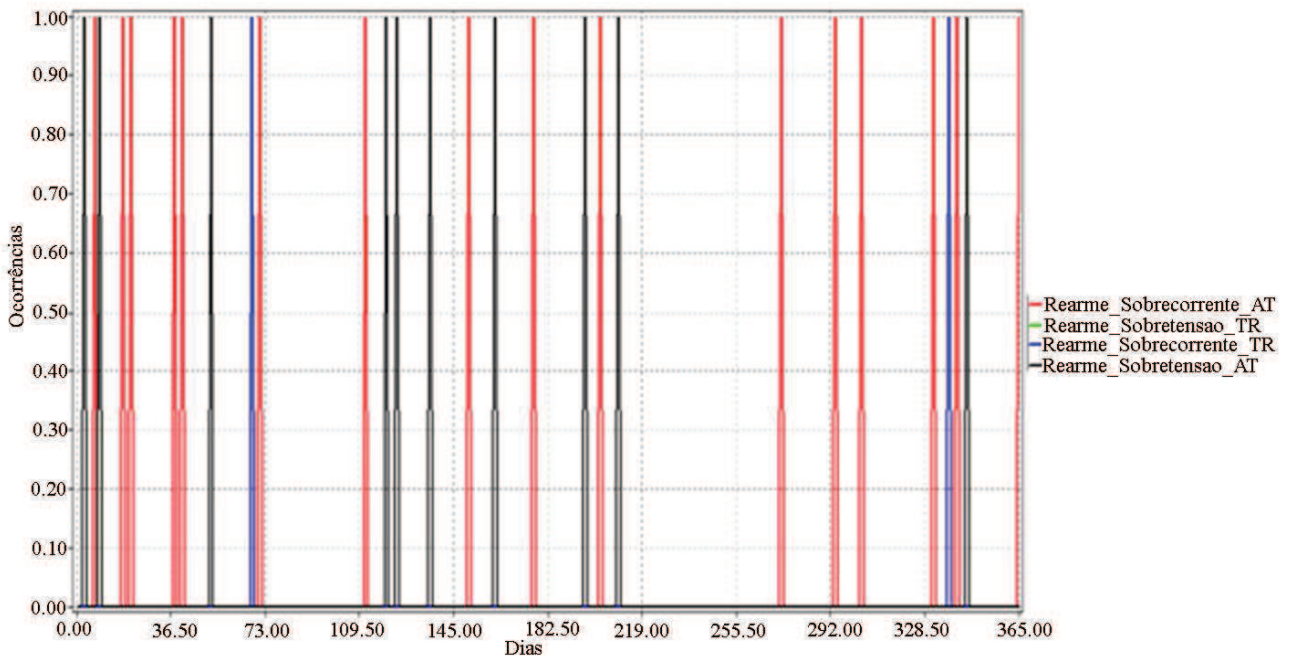


Figura 5.4: Cenário 3.

Vantagens da melhoria indicada no cenário 3:

- Melhoria nos índices de confiabilidade do equipamento;
- Redução nas falhas do equipamento, protegendo o transformador contra queima quando da incidência de descargas atmosféricas que atingem a rede de distribuição de energia;
- Maior inibição na formação de ondas de sobretensões que causam danos a equipamentos tanto da concessionária quanto do consumidor;
- Melhoria na proteção do sistema elétrico dos surtos de tensões, que também tem origem durante a manobras de chaves seccionadoras e disjuntores.

Desvantagens da melhoria indicada no cenário 3:

- Maiores gastos com compra de equipamentos;
- Necessidade de adequações e instalações dos novos equipamentos;
- Aumento dos pontos de manutenção, com uma maior utilização das equipes de manutenção. Quanto maior a quantidade de para raios maior a quantidade de intervenções das equipes de manutenção na troca destes equipamentos.

5.3.4 Cenário 4

Nesse cenário foi considerado a análise, o estudo e a indicação das características de um religador como mais uma melhoria da subestação. Coordenou-se a proteção do religador com o elo fusível, além da posterior simulação no modelo quantitativo. Mais informações do Religador e Elo fusível estão disponíveis no Apêndice E.

Para a seleção das curvas de operação do religador serão analisadas as curvas do elo fusível de curto circuito fase – fase presentes no figura 5.5. E também serão analisadas as curvas do elo fusível fase – terra presentes na figura 5.6.

Na figura 5.5 estão presentes as curvas de curto circuito com a respectiva corrente de curto circuito fase – fase e o tempo de acionamento do religador representados nas curvas de A até H. Também nessa figura está representada a curva de acionamento do elo fusível de 40 K (possui como corrente nominal máxima 40 amperes) com seus tempos de acionamento para cada corrente de curto circuito fase – fase. Para a coordenação do religador e o elo fusível no curto circuito de fase – fase serão adotadas as seguintes curvas para o ajuste da coordenação do religador:

Proteção de fase - fase:

- Curva rápida: D;
- Curva retardada: G.

Foram seleccionadas as curva rápida D e a curva retardada G por serem as curvas que abrangem todas as correntes de curto circuito do elo fusível e possuem os menores tempos de acionamento, tanto na parte de baixo do gráfico, curvas rápidas, como na parte de cima do gráfico curvas retardadas, de acordo com a figura abaixo.

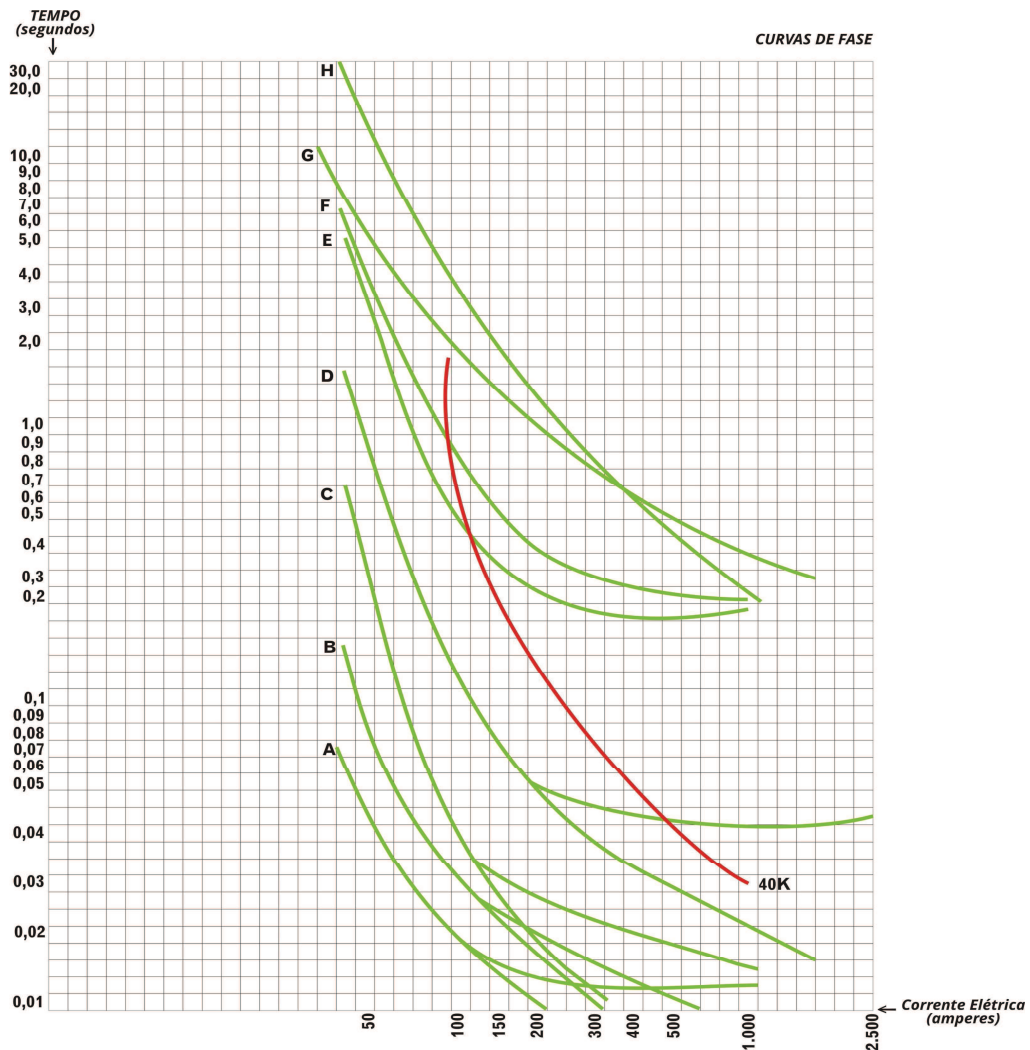


Figura 5.5: Curva elo fusível com religador para curto circuito fase fase.
Fonte: Adaptado Mamede 2011.

Assim o religador será programado para atuar duas vezes na curva rápida D abrindo caso ocorra um curto circuito de fase – fase. Como a curva rápida D tem tempos de atuação menores que o elo fusível, ocorrerá a coordenação do religador com o elo fusível ou seja na primeira e segunda falha de curto circuito fase – fase o religador atuará e o elo fusível não se fundirá. Num terceiro curto circuito fase – fase o elo fusível atuará evitando a falha no sistema. Numa eventual falha do elo

fusível o religador será acionado na curva retardada G que possui um tempo de atuação superior ao do elo fusível.

Assim na falha do elo fusível o religador atua na curva retardada G eliminando a falha de curto circuito e reestabelecendo o sistema elétrico da subestação eliminando assim possíveis falhas do elo fusível. Como por exemplo um curto circuito entre duas fases gerando uma corrente de 300 amperes, o religador atuará na curva D em 0,040 segundos, enquanto o tempo de atuação do elo fusível seria de 0,080 segundos, existindo dessa forma coordenação do religador e elo fusível na curva rápida D. No entanto caso o elo fusível falhe nesse mesmo exemplo de um curto circuito de 300 amperes, o religador atuará na curva retardada H em um tempo de 0,80 segundos garantindo a integridade do sistema elétrico.

Já na figura 5.6 estão presentes as curvas de curto circuito fase – terra com a respectiva corrente de curto circuito e o tempo de acionamento do religador representados nas curvas de J até Q. Também nessa figura está representada a curva de acionamento do elo fusível com seus tempos de acionamento para cada corrente de curto circuito fase – terra.

Para a coordenação do elo fusível e o religador para os curto circuitos de fase – terra serão adotadas as seguintes curvas para o ajuste da coordenação do religador:

Proteção de fase - terra:

- Curva rápida: M;
- Curva retardada: O.

Para a coordenação do elo fusível e o religador nos curto circuitos fase – terra foram selecionadas as curva rápida M e a curva retardada O por serem as curvas que abrangem todas as correntes de curto circuito do elo fusível e possuem os menores tempos de acionamento, tanto na parte de baixo do gráfico, curvas rápidas, como na parte de cima do gráfico curvas retardadas, de acordo com a figura 5.6. Assim o religador será programado para atuar duas vezes na curva rápida M abrindo caso ocorra um curto circuito de fase – terra. Como a curva

rápida M tem tempos de atuação menores que o elo fusível, ocorrerá a coordenação do religador com o elo fusível ou seja na primeira e segunda falha de curto circuito fase – terra o religador atuará preservando o elo fusível. Ocorrendo um terceiro curto circuito fase – terra o elo fusível atuará evitando a falha no sistema. Numa eventual falha do elo fusível o religador atuará na curva retardada O que possui um tempo de atuação superior ao do elo fusível. Assim na falha do elo fusível o religador atua na curva retardada, eliminando a falha de curto circuito e reestabelecendo o sistema elétrica da subestação.

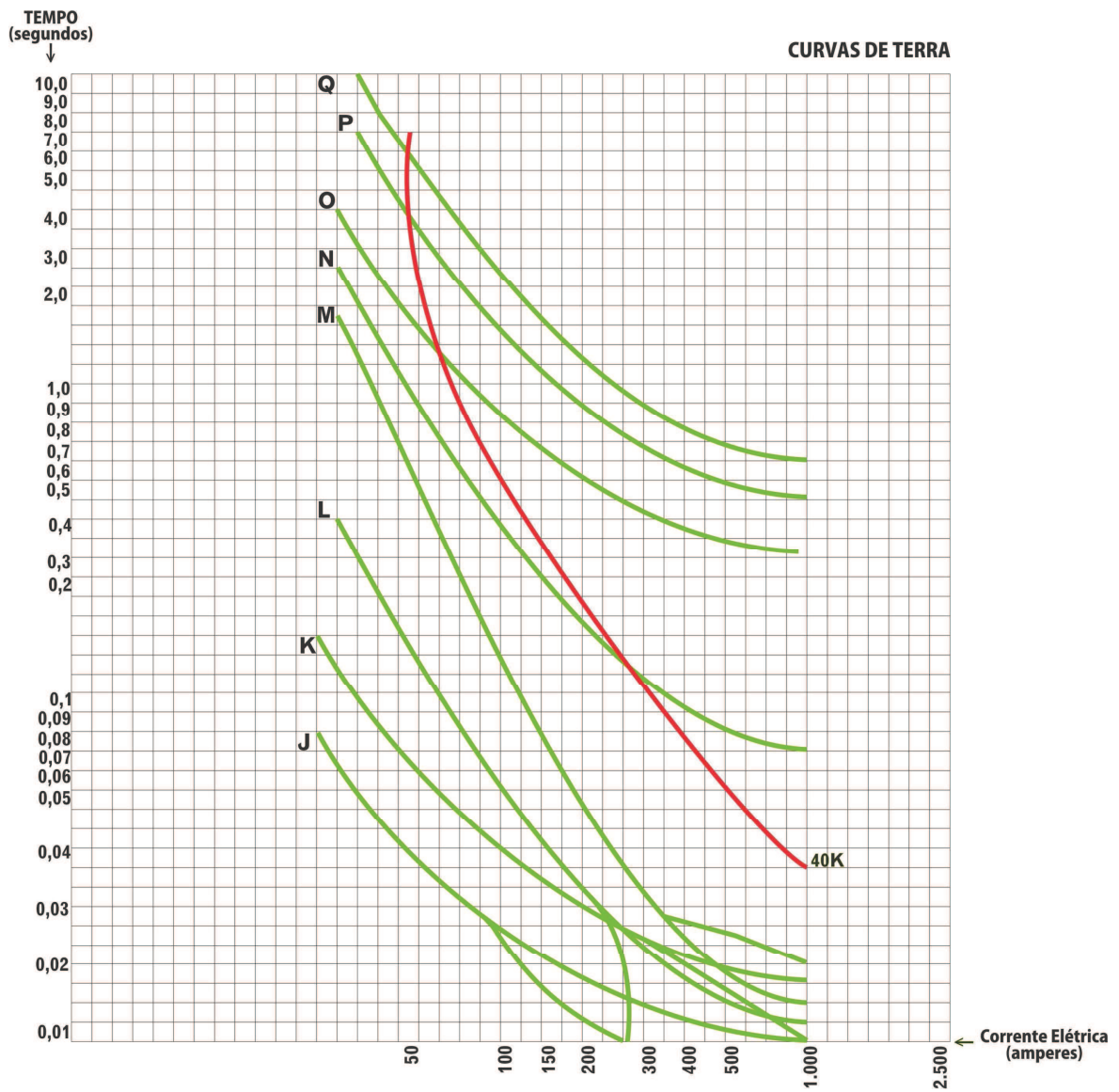


Figura 5.6: Curva elo fusível com religador para curto circuito fase terra.
 Fonte: Adaptado Mamede 2011.

Eliminando assim possíveis falhas do elo fusível. Como por exemplo um curto circuito entre uma fase e o neutro gerando uma corrente de 200 amperes, o religador atuará na curva M em 0,050 segundos de acordo com a figura 10, enquanto o tempo de atuação do elo fusível seria de 0,20 segundos, existindo dessa forma coordenação do religador e elo fusível na curva rápida M. No entanto caso o elo fusível falhe nesse mesmo exemplo de um curto circuito de 200 amperes, o religador atuará na curva retardada O em um tempo de 0,60 segundos garantindo a integridade do sistema elétrico.

Após a indicação dos parâmetros do religador e as curvas de coordenação com o elo fusível foi realizada a simulação para o cenário 4. Com a coordenação do elo fusível e o religador adotou se para a **Transição** falha sobrecorrente um valor 0,0. Para a taxa da **Transição** de descarga atmosférica foi considerado um valor de 0,0356 considerando um seccionamento da rede de alta tensão de 6 km em 6 km. Na **Transição** de curto circuito no modelo quantitativo foi considerada uma taxa de 0,0328 considerando os dados da tabela 5.3. Para a taxa da **Transição** de falha de sobretensão foi utilizado um valor de 0,0054 considerado os dados da tabela 5.4. Com esses valores foi realizada a simulação do cenário 4 resultando em um gráfico presente na figura 5.7. Assim para o Cenário 4 tem se:

- Taxa da **Transição** de falha de descarga atmosférica: 0,0356;
- Taxa da **Transição** de falha de sobrecorrente: 0,0041;
- Taxa da **Transição** de curto-circuito: 0,0;
- Taxa da **Transição** de falha de sobretensão: 0,0054.

Na figura 5.7, com a coordenação do elo fusível e o religador são observados, 12 disparos da **Transição** de falha de descarga atmosférica (rearme sobretensão AT); 10 disparos da **Transição** de falha de curto-circuito (rearme sobrecorrente AT); e 02 disparos da **Transição** de falha de sobretensão (rearme sobretensão TR). Por fim não ocorreu nenhum disparo da **Transição** de

falha de sobrecorrente (rearme sobrecorrente TR), indicando que não houve falhas do equipamento, representada pela legenda rearme sobrecorrente transformador.

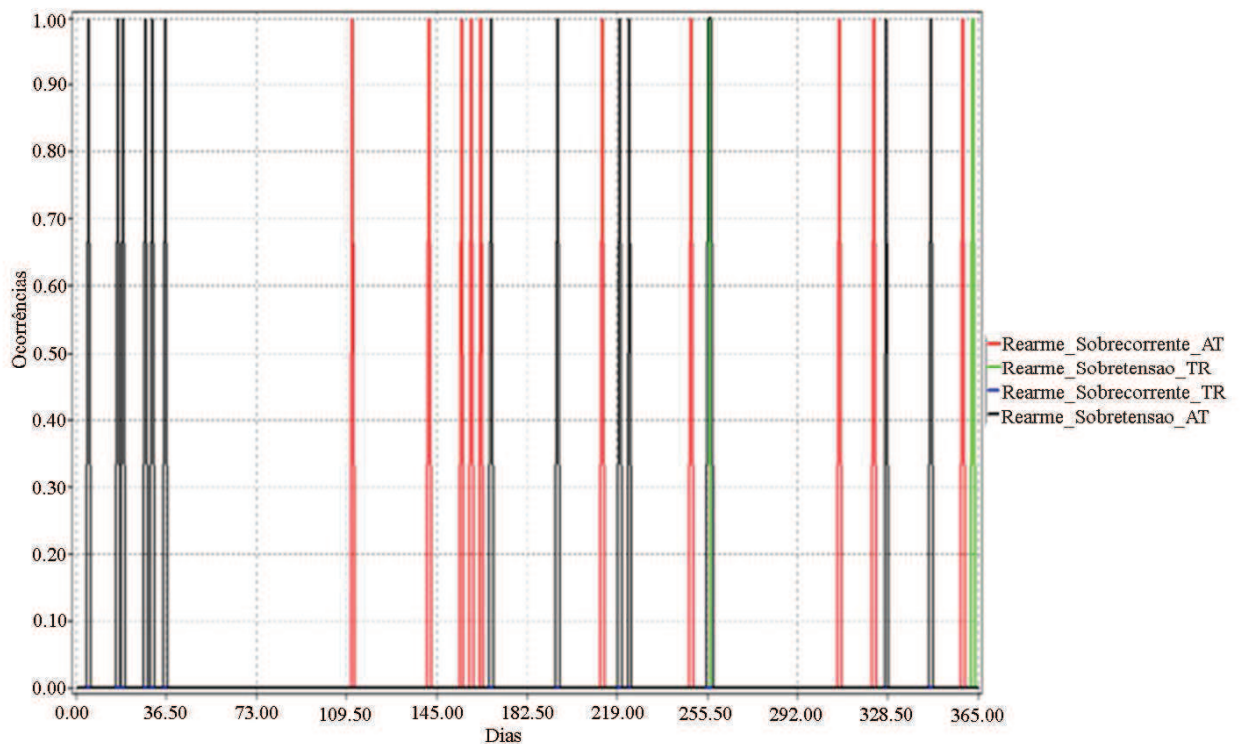


Figura 5.7: Cenário 4.

Vantagens da melhoria indicada no cenário 4:

- Recuperação do sistema na ocorrência de um curto circuito em menor tempo;
- Redução de índices operacionais por minimização das faltas no elo fusível;
- Localização de faltas mais ágeis com uma redução de tempo nas pesquisas de defeito pelas equipes de manutenção;
- Recuperação do investimento em curto espaço de tempo;
- Execução de manobras automáticas sem intervenção de operadores diminuindo assim o tempo de interrupção de energia no sistema elétrico;
- Registro de quedas, oscilações e interrupções de tensão, monitoramento de qualidade do suprimento.

- **Desvantagens da melhoria indicada no cenário 4:**
- Maior dispêndio de recursos financeiros para aquisição, reposição e manutenção destes equipamentos;
- Necessidade de mão de obra qualificada para a instalação e configuração do religador;
- Maior dispêndio financeiro para com equipes especializadas à operar e parametrizar os ajustes destes equipamentos.

Capítulo 6 – Conclusão e Recomendações para Estudos Futuros

6.1 Conclusão

Nessa dissertação objetivou-se apresentar uma modelagem de sistemas de proteção e falhas de uma subestação de distribuição utilizando redes de Petri, identificar as possíveis falhas com as proteções dentro de uma subestação impedindo a interrupção do fornecimento de energia otimizando a produção industrial.

Utilizando se do formalismo das redes de Petri foi realizado a modelagem qualitativa com redes de Petri **Estado / Transição**. Modelou se um sistema hierárquico com um sistema principal (SDF) onde são representadas as origens das falhas além da representação dos alarmes e rearmes do nível secundário. O modelo hierárquico ficou definido com 53 **Estados** diferentes representando os equipamentos utilizados na proteção da subestação, 23 **Transições** representando as ações realizadas para a proteção contra as falhas e com 103 **Arcos** de ligação representando a ligação entre os equipamentos de proteção.

Com o modelo quantitativo foram realizados quatro cenários de simulação. No cenário 1 ou caso base os resultados apresentados ficaram muito próximos dos resultados reais coletados da subestação. No cenário 2 evidenciou-se uma melhoria no que tange à diminuição das falhas de descargas atmosféricas provenientes da rede de alta tensão, alterando o seccionamento da rede a cada quatro quilômetros. No cenário 3 apesar de um investimento financeiro na compra de equipamentos e mais gasto na manutenção para a realização da redundância da proteção. A simulação mostrou a viabilidade dessa ação na diminuição das falhas e conseqüentemente horas paradas na produção da indústria. No cenário 4 com a coordenação entre o elo fusível e o religador não ocorreu nenhum disparo da **Transição** de falha de sobrecorrente transformador,

indicando que não houve falhas do elo fusível também sendo uma solução viável na melhoria da qualidade e minimização de falhas no sistema elétrico.

As contribuições desse trabalho são ainda mais evidentes em virtude da complexidade e tamanho do sistema elétrico e da subestação de distribuição estudada. Inserindo as análises aqui existentes como instrumentos para melhorias na compreensão e na visualização das falhas e proteções num sistema de distribuição, contribuindo para diminuição de falhas e interrupções, o que culmina a geração de melhorias na qualidade do setor elétrico e produtivo.

6.2 Trabalhos Futuros

Como desenvolvimento de futuras pesquisas abaixo são listados alguns tópicos:

- Utilização de uma base de dados baseada em meses não em anos. Dos dados referentes a quantidade de descargas atmosféricas na rede elétrica, falhas do elo fusível, curtos circuito ocorridos na rede elétrica e falhas do para raio;
- Estender a simulação do modelo quantitativo a outras subestações e comparar seus resultados;
- Quantizar os custos financeiros em porcentagens para a realização das melhorias propostas e das perdas. Fazendo um comparativo de custo e benefício.

Referências

- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL, **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – 2016**
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL, **Resolução N° 505**, de 26 de novembro de 2001;
- BARTLEY, P; **Analysis of transformer failures**. [S.l: S. n.]. p. 1-13, 2003.
- BLÄTKE M., HEINER M., MARWAN W. **Tutorial Petri Nets in Systems Biology**. Magdeburg, 2011.
- BRAND, K.P.; KOPAINSKY, J. **Principles and Engineering of Process Control with Petri Nets**. IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 33, n. 2, pp. 138-149, february, 1984.
- DECANINI, J. G. M. S. **Detecção e classificação de faltas de curto-circuito em sistemas de distribuição de energia elétrica usando lógica nebulosa**. 2008. 110.f. Dissertação (Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, São Paulo, 2008.
- FILHO e MAMEDE, **Proteção de Sistemas Elétricos de Potência**. LTC, 2011.
- FRAGOAS, A.G. **Estudo de Caso do uso de Banco de Capacitores em uma rede de distribuição primária - Indicativos da sua viabilidade econômica**. 2008. 1 v. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.
- HEINER M., GILBERT D. **How might Petri nets enhance your systems biology toolkit**. In: Kristensen LM, Petrucci L (eds) *Lecture Notes in Computer Science*. Springer, pp 17–37, 2011.
- HEINER M., HERAJY M., LIU F., ROHR C., SCHWARICK M. **SNOOPY – A unifying Petri net tool**. *Lecture Notes in Computer Science* 7347:398–407. (2012).
- ISERMANN, R. **Supervision, Fault-Detection and Fault-Diagnosis Methods – An introduction**. *Control Eng. Practice*, Vol. 5, No. 5 pp. 639-652, 1997. Elsevier Science Ltd.
- JENSEN, K. **“Coloured Petri Nets: A High Level Language for System Design and Analysis”**. LNCS 483, *Advances in Petri Nets 1981*, G. Rozenberg (ed.); Springer, pp.342-416.
- JENSEN, K. **“Coloured Petri Nets: Basic Concepts, Analysis Methods and Practical Use. Volume 2”**; Springer-Verlag; 2009.
- LAW, A.M. **Simulation Modeling and Analysis – 4th edition**, Mc Graw Hill, 2007.
- LAW, Averill M., W. David Kelton, and W. David Kelton. **Simulation modeling and analysis**. Third Edition. New York: McGraw-Hill, 2000.

LEAL, L.R. **Simulação de eventos discretos aplicada ao gerenciamento de prazo em projetos: um estudo de caso de projeto logístico na indústria de Óleo & Gás**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção). Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, 2011.

LIU, C.; HEINER, M. **“Snoopy: A Unifying Petri Net Tool”**. Applications and Theory of Petri Nets. Vol. 7347, pp. 398-407. 2011.

LO, K.L.; Ng, H. S. and Trecat J. **Power Systems Fault Diagnosis Using Petri Nets**. IEE Proceedings on Generation, Transmission and Distribution. Vol. 144, No. 3, pp. 231-236. May 1997.

LO. K. L. ET AL. **Extended Petri Nets models for fault diagnosis for substation automation**. IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib. v. 146, n. 3, p. 229-234, May. 1999.

Lund E.W. Guldberg and Waage and the law of mass action. **Journal of Chemical Education** 42:548. doi: 10.1021/ed042p548 (1965).

MARRANGHELLO. N; **Redes de Petri: Conceitos e Aplicações**, 2005.

MAMEDE, J. **Sistemas Elétricos Industriais**. 5ª ed., Rio de Janeiro: LTC, 1990.

MAMEDE, J. **Sistemas Elétricos Industriais**. 8ª ed., Rio de Janeiro: LTC, 2011.

MATIAS, J.V.C. **Produção, Transporte e Distribuição de Energia Elétrica**. Lisboa, 2002.

MEDEIROS, E. B. ET AL. **Uma Nova Abordagem para Diagnósticos de Falta no Sistema Elétrico Baseado em Redes de Petri Coloridas**. XII ERIAC (Décimo Segundo Encontro Regional Ibero-americano do CIGRÉ), 2007.

MILASCH, M. **Manutenção de transformadores em líquido isolante**. São Paulo: Edgard Blücher, 1984.

MOLLOY, M.K. **On the Integration of Delay and Throughput Measures in Distributed Processing Models**. PhD thesis, University of California, Los Angeles, 1981.

MORETO, M. **Localização de faltas de alta impedância em sistemas de distribuição de energia: uma metodologia baseada em redes neurais artificiais**. 2005. 126.f. Dissertação (Mestrado Automação e Instrumentação Eletro-Eletrônica)– Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

MURA I., CSIKÁSZ-NAGY A. **Stochastic Petri Net extension of a yeast cell cycle model**. Journal of Theoretical Biology 254:850–860. doi: 10.1016/j.jtbi.2008.07.019, 2008.

MURATA, T. **Petri Nets: Properties, Analysis and Applications**. Proceedings of the IEEE, 77, n 4, 1989.

NATKIN, S. **Réseaux de Petri Stochastiques**. PhD thesis, CNAM, Paris, 1980.

PAREDES, A.E. **Integração de Sistemas de Supervisão, Proteção e Automação de Subestações de Energia Elétrica**. Itajubá, 2002.

PENTEADO NETO, R. A. **Sistemas para detecção de falta de alta impedância e de rompimento de condutores em redes de distribuição de energia elétrica**. 2005. 114 f. Tese (Engenharia e Ciência dos Materiais) – Faculdade de Engenharia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

PETRI, C.A. **Kommunikation mit Automaten. Schriften des IIM** Nr.2, Institut für instrumentelle Mathematik, Bonn, 1962.

SÁ, J.L.P. de; PAIVA, J.P.S. **Design and verification of concurrent switching sequences with Petri Nets**. IEEE Transactions on Power Delivery. v. 5, n. 4, p. 1766-1772, Nov. 1990.

SAMPAIO, R. F. **Sistema de Diagnóstico de Falhas para Subestações Baseado em Redes de Petri Coloridas**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Ceará. Junho 2002.

SAMPAIO, R. F.; BARROSO, G.C.; LEÃO, R.P.S. **System of Fault Diagnosis for Electric Power System Based on Colored Petri Nets**, I Brazilian Meeting on Petri Nets (BMPN). Natal (RN), Brazil. Vol.1, pp.1-6. Sept. 2002.

SANTOS, F. G. et al. **Sistema de diagnóstico de faltas para sistemas elétricos baseado em redes de petri colorida**. [s.l.: s.n.], 2007.

SOUZA, Denise Cascão Poli. **Falhas e defeitos ocorridos em transformadores de potência do sistema elétrico da Celg, nos últimos 28 anos: um estudo de caso**. [Dissertação] Mestrado. Universidade Federal de Goiás. Escola de Engenharia Elétrica e de Computação. Goiânia-GO, 2008.

TANG, Xiwei; WANG, Jianxin. **Fangming. Modeling of a transmission line protection relaying scheme using Petri Nets**. IEEE Trans. Power Delivery. v. 12, n. 3, p. 1055-1063, Jul. 1997.

TANG, Xiwei; WANG, Jianxin. **Fangming. Modeling of a transmission line protection relaying scheme using Petri Nets**. Electric Power Systems Research. v. 44, p. 175-181, 2001.

VIEIRA, G.E. **Uma revisão sobre a aplicação de simulação computacional em processos industriais**. XIII SIMPEP. Bauru, 2006.

YANG, Chun-Ling; YOKOYAMA, Akihiko. **Fault section Estimation of Power System using Color time Petri Nets**. Electric Engineering in Japan. v. 115, n. 2, , p. 89-101, 1995.

APÊNDICE A

A.1 Estados do modelo qualitativo (SDF AT)

O conjunto de **Estados** no (SDF AT) da rede de Petri é definido como os equipamentos necessários para a sua proteção contra as falhas de descarga atmosférica e curto circuito. Abaixo estão descritos cada um desses **Estados**.

$P(\text{SDF AT}) = \{\text{Equipamentos de proteção da entrada de alta tensão}\};$

- Mufla de Entrada = é o equipamento localizado no final dos cabos da rede de alta tensão serve como a **Transição** da rede elétrica para a entrada de alta tensão da subestação.
- Para Raio de Entrada AT = é o equipamento de proteção contra uma descarga atmosférica, onde se realiza a leitura da presença ou não de uma corrente de valor muito acima do valor nominal.
- Alarme Descarga Atmosférica AT = é o equipamento que irá indicar o **Estado** de alarme quando ocorrer uma descarga atmosférica. Ele é desativado pelo rearme de descarga atmosférica entrada AT.
- Chave Fusível = esse **Estado** corresponde ao equipamento de proteção contra curto circuito em sistemas de alta tensão.
- Elo Fusível = esse **Estado** indica o equipamento que irá se fundir abrindo o sistema quando da passagem de uma corrente de curto circuito. É o equipamento ativo na proteção de curtos circuitos interrompendo a falha.
- Chave Rearme Descarga atmosférica AT = é o **Estado** onde ocorre o rearme do sistema de proteção contra descarga atmosférica. Indicando que os equipamentos de proteção estão prontos a atuar.
- Alarme Curto Circuito AT = é o equipamento que irá indicar o **Estado** de alarme quando ocorrer um curto circuito. Ele é desativado pelo rearme de curto circuito.

- Chave Rearme Curto Circuito Entrada AT = é o **Estado** onde ocorre o rearmesistema de proteção contra curto circuito. Indicando que os equipamentos de proteção estão prontos a atuar.

A.2 Transições do modelo qualitativo (SDF AT)

O conjunto de **Transições** no (SDF AT) da rede de Petri é definida como as ações dos eventos necessários para a proteção da entrada de alta tensão das falhas de descarga atmosférica e curto circuito. Abaixo estão descritas cada uma dessas **Transições**.

$T(\text{SDF AT}) = \{\text{Ações de eventos para a proteção da entrada de alta tensão}\};$

- Falha Descarga Atmosférica = representa o momento que ocorre a falha por descarga atmosférica.
- Falha Sobretensão = essa **Transição** é disparada quando ocorre a falha do para raio não conseguindo isolar a falha de descarga atmosférica, deixando passar uma grande tensão provocando a falha de sobretensão no transformador.
- Rearme Descarga Atmosférica AT= representa a ação de desligar o alarme de descarga atmosférica e sinalizar que o para raio está habilitado. Indicando que os equipamentos de proteção estão prontos a atuar.
- Falha Curto Circuito = representa o momento que ocorre a falha por curto circuito.
- Rearme Curto Circuito AT = representa a ação de desligar o alarme de curto circuito e sinalizar que o reles principal e auxiliar estão habilitados.
- Falha Sobrecorrente = essa **Transição** é disparada quando ocorre a falha do elo fusível não conseguindo isolar a falha de curto circuito, deixando passar uma grande corrente elétrica provocando a falha de sobrecorrente no transformador.

A.3 Marcação Inicial do Modelo qualitativo (SDF AT)

O conjunto de **Marcação** inicial no (SDF AT) é definido por um vetor $M_0 = [1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ \dots]$.

A **Marcação** inicial faz parte da modelagem, onde uma falha na definição da **Marcação** inicial

pode resultar em um modelo inconsistente ou com falhas de execução. A **Marcação** inicial no modelo do (SDF AT) representa quais equipamentos estão ativos no momento inicial do modelo (SDF AT).

- M_0 (SDF AT) = [1 1 0 1 0 0 0 0]:

Tabela A.1: Estados X Marcação Inicial (SDF AT) descarga atmosférica.

Estados	Marcação Inicial (M0)
Rede Alta Tensão	1
Para Raio Entrada AT	1
Alarme Descarga Atmosférica	0
Elo Fusível	1
Chave rearme Descarga Atmosférica	0
Mufla Entrada	0
Alarme Curto Circuito	0
Chave Rearme Curto Circuito	0

A.4 Fluxo das Marcações no Modelo

No (SDF AT) de acordo com a figura 4.3 quando ocorrer uma descarga atmosférica na Rede elétrica de alta tensão uma **Marcação** será adicionada no **Estado** correspondente a Rede elétrica de alta tensão. Essa **Marcação** ira ativar a transição de falha de descarga atmosférica, essa **Transição** envia uma **Marcação** ao **Estado** mufla de entrada. Como o **Estado** para raio possui uma **Marcação** inicial (indicando que está pronto para atuar), a **Transição** diferença de tensão AT é disparada. Essa **Transição** envia uma **Marcação** para o alarme de descarga atmosférica que é ligado e consome a **Marcação** na mufla de entrada e do para raio indicando que o para raio atuou cessando a falha de descarga atmosférica. Quando a chave rearme descarga atmosférica AT é acionada, a **Transição** rearme descarga atmosférica AT é ativada consumindo a **Marcação** do alarme que é desligado e envia uma nova marcação ao **Estado** para raio o deixando pronto para atuar novamente. Se ocorrer falha no **Estado** para raio e sua **Marcação** não for consumida a **Transição** diferença de tensão AT não é ativada sendo ativada a **Transição** falha de sobretensão. Já quando ocorrer um curto circuito na Rede elétrica de alta tensão uma

Marcação será adicionada no **Estado** correspondente a Rede elétrica de alta tensão. Essa **Marcação** irá ativar a **Transição** de falha de curto circuito, essa **Transição** envia uma **Marcação** ao **Estado** chave fusível, como o **Estado** elo fusível possui uma marcação inicial (indicando que está pronto para atuar) a **Transição** diferença de corrente AT é disparada. Essa **Transição** envia uma **Marcação** para o alarme que é ligado e consome as **Marcações** da chave fusível e do elo fusível (indicando que o elo fusível atuou) e abriu o circuito elétrico. Cessando a falha de curto circuito. Quando a chave rearme curto circuito AT é acionada, a **Transição** rearme curto circuito AT é ativada, consumindo a **Marcação** do alarme sendo desligado e enviando uma nova **Marcação** ao **Estado** elo fusível o deixando pronto para atuar novamente. Se ocorrer falha no **Estado** elo fusível e sua **Marcação** não for consumida a **Transição** diferença de corrente AT não é ativada sendo ativada a **Transição** falha de sobrecorrente.

APÊNDICE B

B.1 Estados do modelo qualitativo (SDF TR)

O conjunto de **Estados** no (SDF TR) da rede de Petri é definido como os equipamentos necessários para a proteção do transformador das falhas de sobretensão, sobrecorrente, pressão alta no transformador e temperatura alta no óleo isolante. Abaixo estão descritos cada um desses **Estados**.

$P(\text{SDF TR}) = \{\text{Equipamentos de proteção do transformador}\};$

- Transformador de Potencial do Transformador (T.P) = é o equipamento (sensor) que realiza a leitura de uma tensão acima do valor nominal de operação numa eventual sobretensão.
- Transformador de Corrente do Transformador (T.C) = é o equipamento (sensor) que realiza a leitura de uma corrente acima do valor nominal de operação numa eventual sobrecorrente.
- Alarme Sobretensão Transformador = é o equipamento que irá indicar o **Estado** de alarme quando ocorrer uma sobretensão. Ele é desativado pela chave rearme de sobretensão do transformador.
- Alarme Sobrecorrente Transformador = é o equipamento que irá indicar o **Estado** de alarme quando ocorrer uma corrente acima do valor nominal. Ele é desativado pela chave rearme de sobrecorrente do transformador.
- Rele 1 Transformador = esse **Estado** indica que o equipamento rele 1 está habilitado e pronto para atuar em uma eventual falha de sobrecorrente.
- Rele 2 Transformador = esse **Estado** indica que o equipamento rele 2 está habilitado e pronto para atuar em uma eventual falha de sobretensão.
- Disjuntor Transformador = esse **Estado** indica que o equipamento disjuntor foi acionado

pelo rele 1 ou pelo rele 2 e abriu o circuito elétrico interrompendo a sobretensão ou a sobrecorrente, isolando a falha.

- Chave Rearme Sobretensão Transformador = é o **Estado** que representa o rearme do rele 2 do transformador, do disjuntor e o desligamento do alarme de sobretensão. Indicando que os equipamentos de proteção contra sobretensão estão prontos a atuar.
- Chave Rearme Sobrecorrente Transformador = é o **Estado** que representa o rearme do rele 1 do transformador, do disjuntor e o desligamento do alarme de sobrecorrente. Indicando que os equipamentos de proteção contra sobrecorrente estão prontos a atuar.
- Sensor Pressão Alta Transformador = é o equipamento que realiza a leitura de uma pressão acima do seu valor normal dentro do transformador.
- Alarme Pressão Alta Transformador = é o equipamento que irá indicar o **Estado** de alarme quando ocorrer uma pressão acima do normal. Ele é desativado pelo rearme de curto circuito.
- Rele 3 Transformador = esse **Estado** indica que o equipamento rele 3 está habilitado e pronto para atuar em uma eventual falha de pressão.
- Válvula Transformador = esse **Estado** indica que o equipamento válvula do transformador foi acionada pelo rele 3 do transformador.
- Chave rearme Pressão Alta Transformador = é o **Estado** que representa o rearme do sistema de proteção contra curto circuito na entrada de alta tensão. Indicando que os equipamentos de proteção estão prontos a atuar.
- Sensor Temperatura Óleo Transformador = é o equipamento que realiza a leitura de uma temperatura acima do seu valor normal dentro do transformador.
- Alarme Temperatura Alta Transformador = é o equipamento que irá indicar o **Estado** de alarme quando ocorrer uma temperatura acima do normal. Ele é desativado pelo rearme de temperatura alta.

- Rele 4 Transformador = esse **Estado** indica que o equipamento rele 4 está habilitado e pronto para atuar em uma eventual falha de temperatura.
- Ventilação Transformador = esse **Estado** indica que o equipamento ventilador do transformador foi acionada pelo rele 4 do transformador.
- Chave Rearme Temperatura Alta Transformador = é o **Estado** que representa o rearme do sistema de proteção contra temperatura alta na transformador. Indicando que os equipamentos de proteção estão prontos a atuar.

B.2 Transições do modelo qualitativo (SDF TR)

O conjunto de **Transições** no (SDF TR) da rede de Petri é definida como as ações de importantes eventos necessários para a proteção do transformador das falhas de sobretensão, sobrecorrente, pressão alta e temperatura alta do óleo isolante. Abaixo estão descritas cada uma dessas **Transições**.

$T(\text{SDF TR}) = \{\text{Ações de eventos para a proteção do transformador}\};$

- Falha sobretensão = representa o momento que ocorre a falha por sobretensão.
- Falha sobrecorrente = é a **Transição** que indica a ocorrência da falha de sobrecorrente.
- Diferença de corrente = essa **Transição** corresponde a diferença de corrente lida no transformador de corrente (T.C) e a corrente nominal do sistema. Quando ocorrer uma diferença acima de dez por cento o rele 1 atua abrindo o disjuntor cessando a falha de sobrecorrente.
- Diferença de tensão = essa **Transição** corresponde a diferença de tensão lida no transformador de potencial (T.P) e a tensão nominal do sistema. Quando ocorrer uma diferença acima de quinze por cento o rele 2 atua abrindo o disjuntor cessando a falha de sobretensão.
- Rearmar Sobretensão Transformador = representa a ação de desligar o alarme de sobretensão e sinalizar que rele 2 está habilitado.

- Rearmar Sobrecorrente Transformador = representa a ação de desligar o alarme de sobrecorrente e sinalizar que rele 1 está habilitado.
- Falha Alta Pressão = representa que ocorreu a falha por elevação da pressão no interior do transformador.
- Rearmar Pressão Alta Transformador = representa a ação de desligar o alarme de pressão alta e sinalizar que o rele 3 do transformador está habilitado.
- Falha Alta Temperatura = representa que ocorreu a falha por elevação da temperatura do óleo isolante do transformador.
- Rearmar Alta Temperatura Transformador = representa a ação de desligar o alarme de temperatura alta e sinalizar que o rele 4 do transformador está habilitado.

B.3 Marcação Inicial do Modelo qualitativo (SDF TR)

O conjunto de **Marcação** inicial no (SDF TR) é definido por um vetor $M0 = [1\ 0\ 1\ 0\ 1\ 0\ 0\ \dots]$. A **Marcação** inicial faz parte da modelagem, onde uma falha na definição da **Marcação** inicial pode resultar em um modelo inconsistente ou com falhas de execução. A **Marcação** inicial no modelo do (SDF TR) representa quais equipamentos estarão ativos no momento inicial de uma falha no sistema do transformador.

$M0$ (SDF TR) = $[0\ 0\ 1\ 0\ 0\ 1\ 0\ 0\ 0]$ para a sub rede que modela a falha de sobretensão e sobrecorrente.

Tabela B.1: Estados X Marcação Inicial (SDF TR) sobretensão e sobrecorrente.

Estados	Marcação Inicial (M0)
Transformador de Corrente Transformador	0
Transformador de Potencial Transformador	0
Rele 1 Transformador	1
Alarme Sobretensão Transformador	0
Alarme Sobrecorrente Transformador	0
Rele 2 Transformador	1
Chave Rearme Sobrecorrente Transformador	0
Chave Rearme Sobretensão Transformador	0
Disjuntor Transformador	0

$M0$ (SDF TR) = [1 0 1 0 0] para a sub rede que modela a falha de pressão alta.

Tabela B.2: Estados X Marcação Inicial (SDF TR) pressão alta.

Estados	Marcação Inicial (M0)
Sensor Pressão Alta Transformador	1
Alarme Pressão Alta Transformador	0
Rele 3 Transformador	1
Válvula Transformador	0
Chave Rearme Pressão Alta Transformador	0

$M0$ (SDF TR) = [1 0 1 0 0] para a sub rede que modela a falha de alta temperatura

Tabela B.3: Estados X Marcação Inicial (SDF TR) temperatura alta.

Estados	Marcação Inicial (M0)
Sensor Temperatura Óleo Transformador	1
Alarme Temperatura Alta Transformador	0
Rele 4 Transformador	1
Ventilação Transformador	0
Chave Rearme Temperatura Alta Transformador	0

B.4 Fluxo das Marcações no Modelo

De acordo com a figura 4.4 Quando ocorre a falha do elo fusível na entrada de alta tensão a **Transição** de falha de sobrecorrente é disparada. O **Estado** transformador de corrente (TC) realiza a leitura dessa sobrecorrente tendo uma **Marcação** adicionada a ele. Como o rele 1 também possui uma **Marcação** inicial (indicando que está pronto para atuar) a **Transição** diferença de corrente TR é ativada. Adicionando uma **Marcação** no alarme de sobrecorrente TR sendo ligado e outra no disjuntor do transformador sendo acionado e abrindo o circuito elétrico e cessando a falha de sobrecorrente. Quando a chave rearme sobrecorrente TR é acionada, a **Transição** rearme sobrecorrente AT é ativada, consumindo a **Marcação** do alarme sendo desligado e do disjuntor que é fechado e também envia uma nova **Marcação** ao **Estado** rele 1 o deixando pronto para atuar novamente.

Conforme a figura 4.4 quando ocorre uma falha no para raio da entrada de alta tensão a **Transição** de falha de sobretensão é disparada. O **Estado** transformador de potencial (TP) realiza a leitura dessa sobretensão tendo uma **Marcação** adicionada a ele. Como o rele 2 também possui uma **Marcação** inicial (indicando que está pronto para atuar) a **Transição** diferença de tensão TR é ativada. Adicionando uma **Marcação** no alarme de sobretensão sendo ligado e outra no disjuntor do transformador que é acionado, abrindo o circuito elétrico e cessando a falha de sobretensão. Quando a chave rearme sobretensão TR é acionada, a **Transição** rearme sobretensão AT é ativada. Consumindo a **Marcação** do alarme sendo desligado e a **Marcação** do disjuntor sendo fechado e envia uma nova **Marcação** ao **Estado** rele 2 o deixando pronto para atuar novamente.

Na figura 4.5 o **Estado** sensor de pressão alta (sensor de buchholz) realiza a leitura da pressão alta tendo uma **Marcação** inicial (indicando a existência de uma alta pressão). Como o rele 3 também possui uma **Marcação** inicial (indicando que está pronto para atuar) a **Transição** falha de alta pressão é ativada. Adicionando uma **Marcação** no alarme sendo ligado e outra na válvula de respiro do transformador abrindo a válvula e permitindo a saída dos gases em excesso do interior do transformador, cessando a falha de pressão alta. Quando a chave rearme pressão alta TR é acionada, a **Transição** rearme pressão alta TR é ativada. Consumindo a **Marcação** do alarme que é desligando e da válvula que é fechada e envia uma nova **Marcação** ao **Estado** rele 3 o deixando pronto para atuar novamente.

Na figura 4.6 é apresentado o modelo qualitativo para a falha de temperatura alta no transformador. O **Estado** sensor de temperatura alta (PT 100) realiza a leitura da temperatura estando com uma **Marcação** inicial (indicando que existe uma alta temperatura). Como o rele 4 também possui uma **Marcação** inicial (indicando que está pronto para atuar) a **Transição** falha de alta temperatura é ativada. Adicionando uma **Marcação** no alarme sendo ligado e outra no **Estado** ventilação do transformador ligando sua ventilação e cessando assim a falha de

temperatura alta. Quando a chave rearme temperatura alta TR é acionada, a **Transição** rearme temperatura alta TR é ativada. Consumindo a **Marcação** do alarme que é desligado e da ventilação que também é desligada e envia uma nova **Marcação** ao **Estado** rele 4 o deixando pronto para atuar novamente.

APÊNDICE C

C.1 Estados do modelo qualitativo (SDF AL)

O conjunto de **Estados** no (SDF AL) da rede de Petri é definido como os equipamentos necessários para a proteção da entrada de alta tensão das falhas de sobrecorrente e impedância.

Abaixo estão descritos cada um desses **Estados**.

$P(\text{SDF AL}) = \{\text{Equipamentos de proteção dos alimentadores}\};$

- Transformador Corrente Alimentadores = é o equipamento que realiza a leitura de uma corrente acima do valor nominal de operação numa eventual sobrecorrente.
- Alarme Sobrecorrente Alimentadores = é o equipamento que irá indicar o **Estado** de alarme quando ocorrer uma sobrecorrente. Ele é desativado pelo rearme de sobrecorrente e impedância dos alimentadores.
- Rele Alimentadores = esse **Estado** indica que o equipamento rele dos alimentadores está habilitado e pronto para atuar em uma eventual falha de sobrecorrente.
- Disjuntor Alimentadores = esse **Estado** indica que o equipamento disjuntor foi aberto interrompendo a passagem da corrente elétrica de sobrecorrente, isolando a falha.
- Chave Rearme Sobrecorrente e Impedância Alimentadores = é o **Estado** onde ocorre o rearme do sistema de proteção contra sobrecorrente e impedância nos alimentadores. Indicando que os equipamentos de proteção estão prontos a atuar.
- Alarme Impedância Alimentadores = é o equipamento que irá indicar o **Estado** de alarme quando ocorrer uma alta impedância. Ele é desativado pelo rearme de sobrecorrente e impedância.
- Rele Diferencial = esse **Estado** indica que o equipamento rele diferencial está habilitado e pronto para atuar em uma eventual falha.

C.2 Transições do modelo qualitativo (SDF AL)

O conjunto de **Transições** no (SDF AL) da rede de Petri é definida como as ações de importantes eventos necessários para a proteção dos alimentadores das falhas de sobrecorrente e impedância.

Abaixo estão descritas cada uma dessas **Transições**.

$T(\text{SDF AL}) = \{\text{Ações de eventos para a proteção dos alimentadores}\};$

- Falha sobrecorrente = representa o momento que ocorre a falha por sobrecorrente.
- Falha Impedância = representa o momento que ocorre a falha por impedância.
- Rearmar Sobrecorrente Impedância Alimentadores = representa a ação de desligar os alarmes de sobrecorrente e de impedância e sinalizar que os rele do alimentador e o rele diferencial estão habilitados. Indicando que os equipamentos de proteção estão prontos a atuar.

C.3 Marcação Inicial do Modelo qualitativo (SDF AL)

O conjunto de **Marcação** inicial no (SDF AL) é definido por um vetor $M_0 = [1\ 0\ 1\ 0\ 1\ 0\ 0\ \dots]$. A **Marcação** inicial faz parte da modelagem, onde uma falha na definição da **Marcação** inicial pode resultar em um modelo inconsistente ou com falhas de execução. A **Marcação** inicial no modelo do (SDF AL) representa quais equipamentos estarão ativos no momento inicial de uma falha no sistema dos alimentadores.

$M_0(\text{SDF AL}) = [1\ 0\ 0\ 1\ 1\ 0\ 0]$ para a sub rede que modela a falha de sobrecorrente e impedância.

Tabela C.1: Estados X Marcação Inicial (SDF AL) sobrecorrente e impedância.

Estados	Marcação Inicial (M0)
Transformador Corrente Alimentadores	1
Alarme Sobrecorrente Alimentadores	0
Alarme Impedância Alimentadores	0
Rele Alimentadores	1
Rele Diferencial	1
Disjuntor Alimentadores	0
Chave Rearme Sobrecorrente Impedância Alimentadores	0

C. 4 Fluxo das Marcações no Modelo

De acordo com a figura 4.7 quando ocorre uma falha de sobrecorrente o transformador de corrente (TC) dos alimentadores realiza a leitura dessa corrente acima do valor nominal apresentando uma **Marcação** inicial (indicando uma sobrecorrente). Como o rele dos alimentadores também apresenta uma **Marcação** inicial (indicando que está pronto para atuar) a **Transição** falha de sobrecorrente é ativada enviando uma **Marcação** ao alarme sobrecorrente alimentadores que é acionado. E também envia uma **Marcação** ao disjuntor dos alimentadores, acionando o disjuntor e abrindo o circuito elétrico cessando a falha de sobrecorrente. Quando a chave rearme sobrecorrente de impedância dos alimentadores for acionada, ela ativa a **Transição** rearmar sobrecorrente e impedância alimentadores. Fazendo com que a **Marcação** do alarme sobrecorrente alimentadores seja consumida o desligando e adicionando uma **Marcação** no rele do alimentador o deixando pronto para atuar novamente.

Ainda na figura 4.7, quando ocorre uma falha de impedância o transformador de corrente (TC) dos alimentadores realiza a leitura dessa corrente acima do valor nominal apresentando uma **Marcação** inicial (indicando que existe uma alta impedância). Como o rele diferencial também possui uma **Marcação** inicial (indicando que está pronto para atuar), a **Transição** falha de impedância é ativada enviando uma **Marcação** ao alarme impedância alimentadores que é ligado, envia também uma **Marcação** ao disjuntor dos alimentadores, acionando o disjuntor e abrindo o circuito elétrico cessando a falha de impedância. Quando a chave rearme sobrecorrente e impedância dos alimentadores for selecionada, ela ativa a **Transição** rearmar sobrecorrente e impedância alimentadores. Fazendo com que a **Marcação** do alarme impedância alimentadores seja consumida o desligando e adicionando uma **Marcação** no rele diferencial o deixando pronto para atuar novamente.

APÊNDICE D

D.1 Estados do modelo qualitativo (SDF BC)

O conjunto de **Estados** no (SDF BC) da rede de Petri é definido como os equipamentos necessários para a proteção da entrada do banco de capacitores das falhas de sobretensão e curto circuito. Abaixo estão descritos cada um desses **Estados**.

P (SDF BC) = {Equipamentos de proteção da entrada do banco de capacitores};

- Transformador Potencial Banco de Capacitores = é o equipamento que realiza a leitura de uma tensão acima do valor nominal de operação numa eventual sobretensão.
- Alarme Falha Sobretensão = é o equipamento que irá indicar o **Estado** de alarme quando ocorrer uma elevação na tensão elétrica. Ele é desativado pelo rearme de sobretensão do banco de capacitores.
- Rele Banco Capacitores = esse **Estado** indica que o equipamento rele do banco de capacitores está habilitado e pronto para atuar em uma eventual falha.
- Chave Rearme Sobretensão Banco de Capacitores = é o **Estado** onde ocorre o rearme do sistema de proteção contra sobretensão no banco de capacitores. Indicando que os equipamentos de proteção estão prontos a atuar.
- Transformador de Corrente Banco de Capacitores = é o equipamento que realiza a leitura de uma corrente acima do valor nominal de operação num eventual curto circuito.
- Alarme Curto Circuito Banco de Capacitores = é o equipamento que irá indicar o **Estado** de alarme quando ocorrer um curto circuito. Ele é desativado pelo rearme de curto circuito do banco de capacitores.
- Fusível Banco de Capacitores = esse **Estado** indica que o equipamento fusível está habilitado e pronto para atuar em uma eventual falha.
- Chave Rearme Curto Circuito Banco de Capacitores = é o **Estado** onde ocorre o rearme do sistema de proteção contra curto circuito no banco de capacitores. Indicando que os

equipamentos de proteção estão prontos a atuar.

D.2 Transições do modelo qualitativo (SDF BC)

O conjunto de **Transições** no (SDF BC) da rede de Petri é definida como as ações de importantes eventos necessários para a proteção da entrada de alta tensão das falhas de descarga atmosférica e curto circuito. Abaixo estão descritas cada uma dessas **Transições**.

T (SDF BC) = {Ações de eventos para a proteção do banco de capacitores};

- Falha Sobretensão = representa o momento que ocorre a falha por elevação da tensão elétrica originada da rede elétrica de baixa tensão.
- Rearmar Sobretensão Banco de Capacitores = representa a ação de desligar o alarme de sobretensão e sinalizar que o rele está habilitado. Indicando que os equipamentos de proteção estão prontos a atuar.
- Falha Curto Circuito = representa o momento que ocorre a falha por curto circuito.
- Rearmar Curto Circuito Banco de Capacitores = representa a ação de desligar o alarme de curto circuito e sinalizar que o fusível está habilitado.

D.3 Marcação Inicial do Modelo qualitativo (SDF BC)

O conjunto de **Marcação** inicial no (SDF BC) é definido por um vetor $M_0 = [1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ \dots]$. A **Marcação** inicial faz parte da modelagem, onde uma falha na definição da **Marcação** inicial pode resultar em um modelo inconsistente ou com falhas de execução. A **Marcação** inicial no modelo do (SDF BC) representa quais equipamentos estão ativos no momento inicial de uma falha no sistema dos banco de capacitores.

M_0 (SDF BC) = [1 0 1 0 0] para a sub rede que modela a falha de sobretensão:

Tabela 4.6: Estados X Marcação Inicial (SDF BC) sobretensão

Estados	Marcação Inicial (M0)
Transformador Potencial Banco Capacitores	1
Alarme Falha Sobretensão	0
Rele Banco Capacitores	1
Disjuntor	0
Chave Rearme Sobretensão Banco Capacitores	0

M_0 (SDF BC) = [1 0 1 0] para a sub rede que modela a falha de curto circuito.

Tabela 4.7: Estados X Marcação Inicial (SDF BC) curto circuito.

Estados	Marcação Inicial (M0)
Transformador Corrente Banco Capacitores	1
Alarme Curto Circuito Banco Capacitores	0
Fusível Banco Capacitores	1
Chave Rearme Curto Circuito Banco Capacitores	0

D. 4 Fluxo das Marcações no Modelo

De acordo com a figura 4.8 é apresentado o modelo qualitativo para a falha de curto circuito no banco de capacitores. O **Estado** transformador de corrente (TC) do banco de capacitores realiza a leitura dessa corrente apresentado uma **Marcação** inicial (indicando que existe uma corrente de curto). Como o fusível do banco de capacitores também possui uma **Marcação** inicial (indicando que está pronto para atuar) a **Transição** falha de curto circuito é ativada enviando uma **Marcação** ao alarme curto circuito banco de capacitores que é ligado e consome a **Marcação** do fusível (indicando que ele se rompeu), abrindo o circuito elétrico cessando a falha de impedância. Quando a chave rearme curto circuito banco de capacitores for selecionada, ela ativa a **Transição** rearmar curto circuito banco de capacitores. Fazendo com que a **Marcação** do alarme curto circuito banco de capacitores seja consumida que é desligado e adiciona uma **Marcação** no fusível banco de capacitores o deixando pronto para atuar novamente.

De acordo com a figura 4.9 é apresentado o modelo qualitativo para a falha de sobretensão no banco de capacitores. O **Estado** transformador de potencial (TP) do banco de capacitores realiza a leitura dessa tensão apresentado uma **Marcação** inicial (indicando que existe uma sobretensão). Como o rele do banco de capacitores também possui uma **Marcação** inicial (indicando que está pronto para atuar) a **Transição** falha de sobretensão é ativada enviando uma **Marcação** ao alarme falha sobretensão que é ligado e também consome a **Marcação** do rele banco capacitores (indicando que ele atuou), e por último essa **Transição** envia uma

Marcação ao disjuntor (indicando que foi acionado) abrindo o circuito elétrico cessando a falha de impedância. Quando a chave rearme sobretensão banco de capacitores for selecionada, ela ativa a **Transição** rearmar sobretensão banco de capacitores. Fazendo com que a **Marcação** do alarme falha sobretensão seja consumida sendo o alarme desligado e adiciona uma **Marcação** no rele banco de capacitores o deixando pronto para atuar novamente.

APÊNDICE E

E.1 Considerações e detalhes do religador utilizado no Cenário 4 da simulação

De acordo com a Norma Brasileira (NBR) 8177, religador é um dispositivo de proteção contra sobrecorrente, automático, destinado a abrir e religar uma ou mais vezes em um circuito de corrente alternada, de acordo com a sequência de operação predeterminada. Por sua vez, a coordenação do religador com o elo fusível é a condição para que os dois equipamentos operem numa sequência previamente definida, quando em condição de falha de sobrecorrente.

Ainda em conformidade à NBR 8177, para faltas permanentes, o sistema coordenado de proteção deverá isolar o menor trecho possível do sistema com a atuação do elo fusível. Já para falhas transitórias, tal sistema deverá eliminar a falha em qualquer parte do sistema de distribuição e no menor tempo possível, bem como proporcionar um esquema de religamento, assegurando a continuidade e o fornecimento de eletricidade.

E.2 Configurações do elo fusível:

- A entrada de alta tensão da subestação em estudo possui como tensão de entrada 13800 volts com uma potência dos transformadores de 1500 watts, uma corrente de entrada de 62,75 amperes, com um elo fusível de 40 K. No contexto atual, a indústria trabalha com uma corrente nominal de carga instalada de 35,85 amperes.

E3 Configurações para o religador:

- Serão adotadas duas operações rápidas e duas com retardo para o religador;
- Relação do sensor (TC de fase): 40 amperes X 2 – X 4;
- Transformador auxiliar da proteção de terra (TC do neutro): H1 – H2;
- Módulo calibrador da corrente de acionamento: 2.

Tabela 5.5: Características dos sensores TC do religador.

Fonte: Mamede (2011).

Relação sensores de fase-A		Corrente de acionamento da proteção de terra															
X2	X4=50	50	40	33	25	19	15	12	9	7	5						
X3	X5=70	70	50	46	35	26	21	17	13	10	8	6	5				
X1	X2=80	80	64	52	40	30	24	19	15	11	9	7	5				
X2	X5=90	90	72	59	45	33	27	22	16	13	10	8	6	4,5			
X1	X3=100	100	80	65	50	37	30	24	18	14	11	9	7	5			
X5	X6=100	110	88	72	55	41	33	26	20	15	12	10	8	5,5			
X1	X4=130	130	104	85	65	48	39	31	23	18	14	12	9	6,5	5		
X4	X6=150	150	120	98	75	56	45	36	27	21	17	14	10	7,5	6	5	
X1	X5=170	170	136	111	85	63	51	41	31	24	19	15	12	8,5	7	5,5	
X3	X6=180	180	144	117	90	67	54	43	33	25	20	16	13	9	7	6	
X2	X6=200	200	160	130	100	74	60	48	36	28	22	18	14	10	8	6,5	5
X1	X6=280	280	224	182	140	104	84	67	50	39	31	25	20	14	11	9	7
Calibração		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Trafo aux.		H1 – H2				H1 – H3				H1 – H4				H1 – H5			

Na Tabela 5 estão os possíveis ajustes dos sensores (TC) para as correntes de curto-circuito entre fase e fase ou para as correntes de curto-circuito dos sensores entre fase e neutro. Convém salientar que tais ajustes que devem ser realizados no religador.

Para uma corrente de carga igual a 35,85 amperes, será escolhida a relação do sensor de fase (TC) a imediatamente superior ao valor da corrente nominal assim a relação selecionada é a $X_2 - X_4 = 40$ amperes.

APÊNDICE F

F.1 Notação Matemática das redes de Petri

Redes de Petri Qualitativa (QPN):

De acordo com (HEINER, 2009) as redes de **Estado/Transição** são puramente qualitativas sem apresentar quantificação de valores ou dependência do tempo de acordo com a definição padrão.

Podendo apresentar uma versão estendida formada por arcos especiais, bem como três extensões quantitativas: redes de Petri estocásticas, redes de Petri contínuas e redes de Petri híbridas.

Uma (QPN) **Estado/Transição** fica bem definida matematicamente por uma tupla (E, T, F, M_0) , onde:

- 1) E é o conjunto de **Estados** na rede, $E = \{e_1, e_2, \dots, e_n\}$;
- 2) T é o conjunto das **Transições** na rede $T = \{t_1, t_2, \dots, t_m\}$;
- 3) F é o fluxo de relações do conjunto de arcos na rede onde $F : ((P \rightarrow T) \cup (T \rightarrow P))$ descreve o conjunto de arcos direcionados ponderados com valores inteiros não negativos.
- 4) M_0 é a **Marcação** inicial, onde: $M_0: E \rightarrow \mathbb{N}$;

No qual M_0 corresponde à **Marcação** inicial com a quantidade de **Marcações** nas posições no início da rede de Petri;

\mathbb{N} corresponde ao conjunto dos números naturais que irão quantificar as **Marcações**; E corresponde aos **Estados** no início da rede de Petri.

O formalismo matemático deve satisfazer algumas premissas, que seriam mais facilmente explicadas no formalismo gráfico, tais como:

Premissa 1) Expressão matemática $F \subseteq (S \times T) \cup (T \times S)$, que restringe a ligação de um arco a dois **Estados**, como também restringe a ligação de um arco a duas **Transições**.

Premissa 2) Expressão matemática $M_0(s) \leq K(s)$, nenhuma **Marcação** inicial pode ser menor que a capacidade de quantidade de **Estados**, garantindo que nenhuma restrição de capacidade será desrespeitada no início de uma (QPN), evitando a explosão da mesma em seu início.

Redes de Petri Estocástica (SPN):

Uma rede de Petri estocástica é uma extensão do formalismo da rede de Petri qualitativa, em que os atrasos de disparo aleatórios são associado às **Transições**. Sendo a especificação do atraso de disparo de natureza probabilística, isto é, função de densidade de probabilidade ou função de distribuição de probabilidade na **Transição** (HEINER, 2011).

Sua notação matemática é representada por uma tupla $N = (E, T_U, F, V, M_0)$ onde (HEINER, 2009):

- 1) $E =$ é o conjunto de **Estados** na rede, $E = \{e_1, e_2, \dots, p_n\}$;
- 2) $T_U =$ corresponde à união de dois conjuntos de **Transição**;

Onde:

T estocástico = é o conjunto de **Transições** estocásticas com tempo de espera exponencialmente distribuído;

T imediata = é o conjunto de **Transições** imediatas com tempo de espera zero.

- 3) F é o fluxo de relações do conjunto de arcos na rede $F \subseteq (P \times T) \cup (T \times P)$, em que nenhum arco pode conectar **Estado a Estado**, ou **Transição a Transição**;

- 4) V é uma função tal que:

$$T \text{ estocástico} \rightarrow H$$

Que atribui uma função de risco estocástica h a cada **Transição** t , pelo que:

$$H = \bigcup_{t \in T \text{ estocástico}} \{ht \mid ht: \mathbb{N}^{|t|} \rightarrow \mathbb{R}^+\}$$

É o conjunto de todas as funções de risco estocástico, e

$$V(t) = ht \quad \forall t \in T \text{ estocástico}$$

5) M_0 é a **Marcação** inicial, onde: $M_0: P \rightarrow N$;

No qual M_0 corresponde à **Marcação** inicial com a quantidade de **Marcações** nos **Estados** no início da rede de Petri;

N corresponde ao conjunto dos números naturais que irão quantificar as **Marcações**; E corresponde aos **Estados** no início da rede de Petri.

A função de risco estocástica h_t define a taxa de **Transição** dependente da **Marcação** $\omega_t(m)$ para a **Transição** t , isto é $h_t = \omega_t(m)$. O domínio de h_t é restrito ao conjunto de **Estados** de entrada de t , denotado por t com $t = \{p \in P \mid A(p,t) \neq 0\}$ para impor uma estreita relação entre a estrutura da rede e as funções de risco. Entretanto, $\omega_t(m)$ depende apenas de uma sub-marcação (HEINER, 2011).

Redes de Petri Contínua (CPN):

Novamente, a estrutura de rede de uma rede de Petri contínua é adotada a partir da estrutura da Rede de Petri qualitativa. Assim, obtem-se o mesmo espaço de estado qualitativo da estrutura da rede e pode-se aplicar as mesmas técnicas de análise estrutural às redes contínuas de Petri. Em redes de Petri contínuas, a **Marcação** agora é dada por um número real positivo, chamado de **Marcas**, em vez de um número inteiro, como antes no caso de redes de Petri qualitativas e estocásticas. O valor da **Marcação** pode ser considerado por exemplo uma concentração de um certo valor (HEINER, 2011).

Sua notação matemática é representada por uma tupla $N = (E, T, F, V, M_0)$, onde (HEINER, 2009):

- 1) $E =$ é o conjunto de **Estados** na rede, $E = \{e_1, e_2, \dots, p_n\}$;
- 2) T é o conjunto de **Transições** contínuas.
- 3) $F: ((P \times T) \cup (T \times P)) \rightarrow R + 0$ define o conjunto de arcos direcionados, ponderados por inteiro não negativo valores

4) $V: T \rightarrow H$ é uma função, que atribui uma função de taxa de disparo ht a cada **Transição** t , pelo que $H: = \{ St \in T \mid ht: \mathbb{R} \mid \bullet t \mid \rightarrow \mathbb{R}^+ \}$ é o conjunto de todas as funções de taxa de disparo, e $v(t) = ht$ para todos **Transições** $t \in T$.

5) M_0 é a **Marcação** inicial, onde: $M_0: E \rightarrow \mathbb{N}$;

No qual M_0 corresponde à **Marcação** inicial com a quantidade de **Marcações** nos **Estados** no início da rede de Petri;

\mathbb{N} corresponde ao conjunto dos números naturais que irão quantificar as **Marcações**; E corresponde aos **Estados** no início da rede de Petri.

Redes de Petri Colorida:

As redes de Petri coloridas foram propostas pela primeira vez por Jensen, que combinam Redes de Petri com capacidades de linguagens de programação para descrever os tipos de dados e operações, proporcionando assim uma maneira flexível de criar modelos compactos e parametrizáveis (JENSEN, 2009).

Redes de Petri coloridas são um conceito de modelagem que amplia as redes de Petri quantitativa e qualitativa combinando as capacidades de linguagens de programação para descrever os tipos e operações de dados. Isto acrescenta o conceito de "cor" para distinguir **Marcações** e expressões de arco que especificam qual **Marcação** pode fluir sobre os arcos. Além disso, as expressões booleanas (guardas) podem ser definidas nas **Transições** definindo restrições adicionais para habilitá-las (JENSEN, 2009).

A seguir, damos a definição de redes de Petri qualitativas coloridas (QPN^C), na definição de redes de Petri coloridas de Jensen. Aqui denotamos por EXP o conjunto de expressões que cumprem uma sintaxe predefinida, que são usado como expressões de arco, guardas, etc. Uma rede de Petri colorida possui como notação matemática uma tupla $(E, T, A, \Sigma, C, G, f, m_0)$, onde (HEINER, 2009):

- 1) E é um conjunto finito não vazio de **Estados**;
- 2) T é um conjunto finito de **Transições** não vazias;
- 3) A é um conjunto finito de arcos;
- 4) Σ é um conjunto finito não vazio de tipos, chamado conjuntos de cores;
- 5) $C: E \rightarrow \Sigma$ é uma função de cor que atribui a cada **Estado** $e \in E$ um conjunto de cores $C(e) \in \Sigma$.
- 6) $G: T \rightarrow EXP$ é uma função de guarda que atribui a cada **Transição** $t \in T$ a expressão de guarda que tenha o seu tipo booleano.
- 7) $f: A \rightarrow EXP$ é uma função de arco que atribui a cada arco $a \in A$ um arco expressão que tem um tipo de conjunto múltiplo $C(p) MS$, onde p é o **Estado** conectado para o arco a , e $C(p) MS$ é conjunto múltiplo de cores $C(p)$.
- 8) $m_0: E \rightarrow EXP$ é uma função de inicialização que atribui a cada **Estado** $e \in E$ uma expressão de inicialização que tenha um tipo de conjunto múltiplo $C(p) MS$.