

Universidade Federal de Campina Grande
Centro de Engenharia Elétrica e Informática
Curso de Pós-Graduação em Informática

Dissertação de Mestrado

Descoberta de Causa-raiz em Ocorrências de
Sistemas Elétricos

Stéfani Silva Pires

Campina Grande, Paraíba, Brasil

Agosto - 2010

Universidade Federal de Campina Grande
Centro de Engenharia Elétrica e Informática
Curso de Pós-Graduação em Informática

Descoberta de Causa-raiz em Ocorrências de
Sistemas Elétricos

Stéfani Silva Pires

Dissertação submetida à Coordenação do Curso de Pós-Graduação em
Ciência da Computação da Universidade Federal de Campina Grande -
Campus I como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau
de Mestre em Ciência da Computação.

Área de Concentração: Ciência da Computação

Linha de Pesquisa: Engenharia de Software

Jorge César Abrantes de Figueiredo

(Orientador)

Campina Grande, Paraíba, Brasil

©Stéfani Silva Pires, Agosto, 2010

"Fé é o pássaro que sente a luz quando a
madrugada é ainda escura."

Rabindranath Tagore.

Resumo

Este trabalho apresenta uma técnica de análise de causa-raiz para sistemas elétricos de potência. A análise de causa-raiz é uma forma de auxiliar o operador na compreensão da ocorrência de falha, interpretando as ocorrências com efeito "cascata" entre os elementos da rede. A técnica proposta utiliza o raciocínio baseado em regras, onde regras parametrizadas constroem um modelo de propagação com os diagnósticos de uma ocorrência de falha. A técnica permite apontar o elemento causador da ocorrência, e detalhar a sua propagação para os demais elementos em um modelo de causa-efeito. A utilização de regras parametrizadas traz grandes vantagens ao processo, permitindo que a técnica seja adaptável a alterações na topologia do sistema, e contribuindo para sua escalabilidade. Um estudo de caso foi elaborado para sua avaliação, no contexto da Companhia Hidro Elétrica do São Francisco (CHESF), onde foi desenvolvido um protótipo que implementa a técnica, e levantados um conjunto de regras parametrizadas e um conjunto de cenários de falha utilizando uma ferramenta de simulação de um ambiente real, o *Simulop*. Utilizamos também na avaliação, um conjunto de regressões, que são dados históricos armazenados pela CHESF. As regressões foram importantes na primeira fase de definição da técnica, mas apresentam problemas como a falta de dados, e comportamentos inesperados do sistema, onde a margem de acerto da técnica foi de 74%. Para o conjunto de cenários levantados com o *Simulop*, a técnica proposta conseguiu realizar com sucesso o processo de análise de causa-raiz, identificando a causa-raiz da ocorrência em 100% dos cenários de falha, e detalhando sua propagação para todos os outros elementos da rede envolvidos em 89% dos cenários, onde a margem de erro é composta de cenários cuja propagação foi identificada apenas parcialmente, devido à falta de regras que contemplassem os cenários. Dessa forma, a técnica proposta se mostrou uma abordagem viável para a análise de causa-raiz em sistemas elétricos. A margem de acerto reduzida nas regressões, indica que, para ser aplicada em um ambiente operacional real, faz-se necessária a elaboração de um conjunto de regras mais abrangente e que possa contornar esses problemas.

Abstract

This paper presents a root cause analysis technique for electric power systems. The root cause analysis is a way to assist the operator in understanding the occurrence of failure, interpreting the events cascade occurrences. The proposed technique uses a rule based reasoning, where parameterized rules construct a propagation model with diagnosis of an occurrence of failure. The technique allows to point out the element that causes the occurrence, and detailing its propagation to other elements in a cause and effect model. The use of parameterized rules brings major benefits to the process, allowing the technique to be adaptable to changes in system topology, and contributing to its scalability. A case study was prepared for evaluation in the context of the Companhia Hidro Elétrica do São Francisco (CHESF). We developed a prototype that implements the technique, and raised a set of parameterized rules and a set of failure scenarios using a tool to simulate a real environment, the *Simulop*. We also used in the evaluation process, a set of regressions, which are historical data stored by CHESF. The regressions were important in the first phase of the technique, but they have problems such as lack of data, and unexpected behavior of the system, where the accuracy of the technique was 74%. For the set of scenarios created with Simulop, the proposed technique has achieved success in the root cause analysis process, identifying the root cause of the occurrence in 100% of failure scenarios, and detailing their propagation to all other equipments involved in 89% of scenarios, where the margin of error is composed of scenarios whose propagation has been identified only in part due to the lack of rules that contemplate these scenarios. Thus, the proposed technique proved to be a viable approach to root cause analysis in electrical systems. The reduced margin of success in the regressions, indicates that, to be applied to an operational environment, it is necessary to elaborate a comprehensive set of rules that can deal these problems.

Agradecimentos

Agradeço a Deus, por tudo, e a todos aqueles que de alguma forma contribuíram para a conclusão deste trabalho. Em especial, agradeço a Jorge, meu orientador, por sua paciência e dedicação; a Eloi, por todo auxílio e amizade; e, a Sergio, por sua disponibilidade e atenção durante esse tempo.

Conteúdo

1	Introdução	1
2	Fundamentação Teórica	6
2.1	Eventos e Falhas	6
2.2	Correlação de Eventos	7
2.2.1	Tipos de Correlação	7
2.3	Análise de Causa-raiz	9
3	Uma Técnica de Análise de Causa-raiz	11
3.1	Formalização do Problema	12
3.2	Requisitos da Solução	14
3.3	Solução Proposta	15
3.3.1	Algoritmo	17
3.4	Considerações Finais	21
4	<i>Smart Root-Cause Analyzer</i> - Um Estudo de Caso	23
4.1	Sistema de Diagnóstico de Falhas	24
4.2	<i>SmartRCA</i> - Projeto e Implementação	26
4.2.1	Organização do protótipo	28
4.2.2	Interface da Aplicação	31
4.3	Exemplo de aplicação do protótipo	32
4.4	Considerações Finais	35
5	Avaliação da Técnica	37
5.1	Regressões	38

5.2	Cenários de Simulação	39
5.3	Resultados e Análise	40
5.4	Satisfação dos Requisitos	43
5.5	Considerações Finais	45
6	Trabalhos Relacionados	47
7	Conclusões	51
A	Cenários de Teste	58
B	Regras	74
B.1	Regras de Causa-Raiz	74
B.2	Regras de Relacionamento e Propagação	77

Lista de Figuras

3.1	Processo de interpretação de uma ocorrência de falha no sistema elétrico . . .	12
3.2	Exemplo de resultado esperado da técnica de análise de causa-raiz	14
3.3	Processo de análise de causa-raiz	18
4.1	Arquitetura do <i>Smart-One</i>	25
4.2	Visão Geral do <i>SmartRCA</i>	26
4.3	Arquitetura Geral	28
4.4	Diagrama de pacotes do protótipo	30
4.5	Diagrama de classes do pacote <i>rootCauseAnalysis</i>	30
4.6	Diagrama de classes do pacote <i>rules</i>	31
4.7	Exemplo de tela do sistema com o resultado da análise de causa-raiz	32
4.8	Diagrama unifilar simplificado de subestações da Chesf	33
4.9	Resultado da aplicação da técnica de causa-raiz	34
4.10	Exemplo de execução do algoritmo de análise de causa-raiz	35
5.1	Processo dos testes de regressão	39
5.2	Processo dos testes de simulação	40
5.3	Resultado dos testes de regressão	41
5.4	Resultado dos testes de simulação	42

Lista de Tabelas

3.1	Exemplo de diagnósticos para uma ocorrência de falha	13
3.2	Estrutura das regras de causa-raiz	16
3.3	Estruturas das regras de relacionamento e propagação	17
4.1	Descrição dos pacotes que compõem o protótipo	29
4.2	Exemplo de diagnósticos para uma ocorrência de falha	33

Capítulo 1

Introdução

Com a crescente dependência de nossa sociedade em relação à energia elétrica, os sistemas elétricos de potência vem crescendo consideravelmente em dimensão e complexidade. Normalmente, os sistemas de potência possuem uma infra-estrutura de grande porte, composta por uma coleção de componentes interdependentes, monitorados em tempo-real para garantir a funcionalidade do sistema. Inevitavelmente, esses componentes podem falhar, e sistemas de alarmes são tipicamente utilizados para anunciar um problema que exija a atenção do operador.

Devido à interdependência de seus componentes, se ocorrer uma falha na rede elétrica como a queda de uma linha de transmissão, ou a falha em um transformador, outros equipamentos que possuam alguma relação direta ou indireta podem sentir o efeito dessa falha, e o operador pode receber inúmeros alarmes indicando os sintomas de um único problema. Esse fenômeno é chamado de "cascata de alarmes", e ocorre quando muitos eventos são gerados em um período de tempo muito curto, o que os torna difíceis de monitorar.

O problema de “cascata de alarmes” é bem conhecido na maioria dos ramos industriais. Ele ocorre regularmente em indústrias de geração de energia nuclear, química, processos industriais, florestais, mineração e metalúrgica, etc. Sua ocorrência também é comum em lugares menos óbvios, como, por exemplo, equipamentos médicos e cabines de controle de avião [16].

Em uma ocorrência de falha no sistema elétrico, onde esse efeito cascata seja evidenciado, a análise do seqüenciamento de alarmes que chegam para o operador nem sempre é suficiente para que se consiga entender o que exatamente aconteceu no sistema elétrico.

Essa dificuldade em monitorar e entender o seu funcionamento existe não apenas devido ao elevado número de pontos de medição do sistema, mas também devido à complexidade da análise necessária para entender distúrbios do sistema e ocorrências de falhas [8]. Dessa forma, é um desafio para o operador do sistema manualmente identificar a falha que originou toda a ocorrência, ou seja, a causa-raiz da ocorrência, e rapidamente restaurar o sistema.

A falta de uma reação rápida e precisa para contornar a falha no sistema compromete a sua disponibilidade e a qualidade do fornecimento de energia elétrica. Segundo Coury [9], a qualidade do fornecimento de energia está intimamente ligado à sua restaurabilidade, que é a capacidade dos sistemas de energia elétrica de rapidamente restaurar o fornecimento de energia, reduzindo o tempo em que o sistema permanece fora de operação. Um sistema elétrico que fornece energia de qualidade deve possuir um curto intervalo de tempo de indisponibilidade e, conseqüentemente, a capacidade de retornar ao estado normal de operação após uma falha no sistema. A disponibilidade no contexto desses sistemas tem um grande impacto, uma vez que afeta a disponibilidade de todos os processos que utilizam a eletricidade proveniente da rede elétrica.

Uma alternativa para auxiliar o operador é automatizar o processo de análise de ocorrências de falhas com o objetivo de identificar a causa-raiz da ocorrência, para que esta possa ser apresentada para o operador em tempo real, ou seja, logo após a ocorrência. Esse processo de identificação de causa-raiz, conhecido como análise de causa-raiz, pode resolver o problema da investigação das ocorrências de falha no sistema elétrico, pois, apontar a causa precípua de um incidente proporciona ganho de tempo na identificação e solução de problemas, facilitando a atuação dos operadores. Dessa forma, reduzir o esforço da análise de ocorrências de falha no sistema pode resultar em um decréscimo significativo do tempo em que o sistema ficará indisponível, contribuindo conseqüentemente, para uma maior qualidade do fornecimento da energia elétrica. No entanto, devido à complexidade dos sistemas elétricos, identificar a causa-raiz de uma ocorrência de falha de forma automática e em tempo-real não é uma tarefa trivial.

Além disso, uma característica que consideramos relevante, que deve ser contemplada no processo de análise de causa-raiz, é que a análise deve fornecer uma descrição fiel do que aconteceu na ocorrência, detalhando como a falha inicial (causa-raiz) se propagou, gerando as demais falhas na ocorrência, chamadas de falhas conseqüentes. Dessa forma o operador

terá informações suficientes para entender, de fato, como toda a ocorrência aconteceu.

Muitas técnicas foram propostas na literatura, derivando de diferentes áreas da ciência da computação, incluindo inteligência artificial, teoria dos grafos, teoria da informação, entre outras. Modelos de Fluxo Multinível (MFM) é uma metodologia de modelagem que descreve a estrutura hierárquica de processos industriais complexos, e pode ser utilizado em diferentes aplicações, como por exemplo, validação de medidas, diagnóstico de falhas, e análise de causa-raiz [15; 17; 18; 22]. No entanto, sua modelagem reflete apenas o comportamento do fluxo da energia no sistema. Em sistemas que tem topologia em anel, pode ser difícil identificar qual a direção do fluxo no momento da ocorrência; Redes neurais artificiais são redes computacionais que tentam simular as redes de células nervosas do sistema nervoso central biológico e podem ser utilizadas na resolução de problemas complexos, problemas matematicamente bem definidos, e também para o diagnóstico e processamento de alarmes [2; 6; 25]. Porém, é uma técnica que requer uma base de dados históricos representativa para a etapa de treinamento, que é uma etapa fundamental para determinar a acurácia de seus resultados; Essa necessidade de treinamento também é uma das limitações das árvores de decisão. Árvores de decisão são grafos diretos e acíclicos na forma de uma árvore, onde as folhas são os elementos de classificação, e podem ser utilizadas para detectar e classificar falhas em sistemas complexos [7; 19; 23]; A abordagem baseada em *codebooks* representa um modelo de propagação de falhas em uma matriz contendo o conjunto de todas as falhas possíveis em um determinado domínio. É uma técnica que demanda um grande esforço na modelagem da rede, fazendo assim com que ela seja pouco recomendada para redes complexas [20]; Redes bayesianas são modelos gráficos probabilísticos para raciocínio com incertezas, utilizados em diversas áreas, como em sistemas inteligentes de apoio à decisão, localização de falhas, sistemas de diagnóstico e mineração de dados [5; 24]. Porém são complexas de serem modeladas para grandes sistemas, devido à dificuldade de estimar valores probabilísticos.

Embora algumas técnicas tenham sido utilizadas com sucesso em outros domínios [3; 4; 12], suas aplicações para análise de causa-raiz em sistemas elétricos de potência em particular não são muito relatadas na literatura. Além das limitações apresentadas, a aplicação de muitas dessas técnicas se torna ineficiente no contexto de sistemas elétricos devido a mudanças constantes na topologia do sistema, onde se faz necessária uma nova modelagem,

ou um novo treinamento, dependendo da técnica. Outro desafio, é que nenhuma das técnicas citadas contempla a característica que consideramos relevante no processo de análise de causa-raiz, que é de detalhar toda a propagação da causa-raiz.

Dessa forma, a necessidade de uma solução capaz de identificar a causa-raiz de uma ocorrência de falha, e detalhar sua propagação para os demais elementos envolvidos na ocorrência, de maneira adaptável ao domínio de sistemas elétricos, impulsiona o desenvolvimento de uma nova abordagem que consiga suprir essa lacuna.

Nesse contexto, nosso objetivo é apresentar uma técnica de análise de causa-raiz em tempo real para ocorrências de falhas de sistemas elétricos de potência. A técnica proposta utiliza o raciocínio baseado em regras. Consiste na aplicação de regras parametrizadas para construir um modelo de propagação de falha com os diagnósticos da ocorrência. Diferentemente das soluções apresentadas acima, a técnica proposta apresenta a causa-raiz da ocorrência e sua propagação para as falhas conseqüentes em um modelo de causa-efeito, e é adaptável a mudanças no sistema elétrico. Para abordar diretamente este problema, a técnica proposta foi projetada para trabalhar em conjunto com um Sistema de Diagnóstico de Falhas (FDS, do inglês *Fault Diagnosis System*). FDS são sistemas computacionais capazes de detectar e diagnosticar falhas no ambiente que está inserido, analisando e correlacionando os eventos e o comportamento do ambiente. Dessa forma, depois que o sistema de diagnóstico de falhas termina sua correlação, os diagnósticos gerados são submetidos à técnica de análise de causa-raiz.

Este trabalho está inserido em um projeto de P&D, intitulado *Smart-Two* e financiado pela Companhia Hidro Elétrica do São Francisco (CHESF). O *Smart-Two* é a continuação de um sistema em vigência na CHESF, chamado *Smart Alarms*, que oferece mecanismos para o tratamento de alarmes do sistema elétrico. O *Smart Alarms* é um FDS que consegue reduzir consideravelmente o número de alarmes apresentados para o operador, agregando alarmes para gerar alarmes de mais alto nível, denominados diagnósticos. O *Smart Alarms* aplica técnicas de correlação de eventos para processar os alarmes recebidos do sistema elétrico, tratando ruídos, e gerando os diagnósticos correspondentes. Dessa forma, uma ocorrência é reportada para o operador como um conjunto de diagnósticos.

Para avaliar se a técnica é capaz de identificar a causa-raiz e sua propagação para ocorrências de falhas, elaboramos um estudo de caso no contexto da CHESF: desenvolve-

mos um protótipo que implementa a técnica proposta; levantamos um conjunto de regras parametrizadas e um conjunto de cenários de falhas com especialistas da CHESF. A margem de acerto na identificação da causa-raiz e sua propagação completa foi de 89%. Com isso conseguimos mostrar que a técnica é capaz de realizar uma análise completa, atendendo aos requisitos definidos para a solução, sendo uma abordagem viável no domínio de sistemas elétricos. Utilizamos também na avaliação, um conjunto de regressões, que são dados históricos armazenados pelo *Smart Alarms*. Isso permitiu a avaliação com cenários do mundo real, onde existem problemas como a falta de dados, e comportamentos inesperados do sistema. A margem de acerto foi de 74%, indicando que, para ser aplicada em um ambiente operacional real, faz-se necessária a elaboração de um conjunto de regras abrangente e que possa contornar esses problemas.

Esta dissertação está estruturada em sete capítulos, incluindo esta introdução. No Capítulo 2 apresentamos definições básicas para o entendimento do trabalho. No Capítulo 3, apresentamos os requisitos da solução e a técnica de análise de causa-raiz proposta neste trabalho. O Capítulo 4 apresenta o estudo de caso elaborado com o intuito de avaliar a solução proposta, detalhando o protótipo desenvolvido e sua integração com o *Smart Alarms*, e apresentando um exemplo real de sua aplicação. O processo de avaliação com os cenários de teste e seus resultados, e a avaliação de satisfação dos requisitos são apresentados no Capítulo 5. O Capítulo 6 apresenta os trabalhos relacionados e, por fim, no Capítulo 7 apresentamos as considerações finais do nosso trabalho e trabalhos futuros.

Capítulo 2

Fundamentação Teórica

Sistemas elétricos são sistemas complexos, e sua operação é essencial para a sociedade moderna. Ocorrências de falha nesses sistemas podem ser definidas como discrepâncias entre o estado atual do sistema e o esperado, gerando a incapacidade de vários componentes desempenharem suas funções, sendo reportadas para o operador na forma de eventos que representam o estado do sistema. A análise automática desses eventos capaz de identificar a causa-raiz da ocorrência e detalhar seu efeito de propagação pode agilizar o trabalho de interpretação da ocorrência por parte do operador.

Este capítulo apresenta uma visão geral sobre análise de causa-raiz e correlação de eventos, assim como alguns conceitos fundamentais para o melhor entendimento do nosso trabalho. Na Seção 2.1 apresentamos definições de eventos e falhas; a Seção 2.2 define o processo de análise de causa-raiz, e a Seção 2.3 apresenta brevemente os principais tipos de correlação de eventos.

2.1 Eventos e Falhas

Eventos são ocorrências de acontecimentos significativos apresentados a partir de uma fonte para o sistema, onde cada evento acontece em um instante de tempo particular. É a menor unidade de representação do estado do sistema, e são de fundamental importância, pois quando examinados coletivamente, fornecem um quadro geral de todo o funcionamento do sistema. Um evento está normalmente associado a um objeto sendo monitorado.

Falhas são eventos, que causam uma ou mais condições anormais e indesejáveis de partes

do sistema. As falhas do sistema são reportadas para o operador como sintomas de um problema e usualmente aparecem na forma de alarmes. Dessa forma, os alarmes são manifestações externas das falhas. Falhas podem possuir relacionamentos de causa-efeito entre si, onde uma falha que não é causada por nenhuma outra é chamada de *causa-raiz*.

Em sistemas elétricos os eventos e alarmes são provenientes de diversos dispositivos de sensoriamento distribuídos pela rede elétrica, e revelam, basicamente, o estado de sensores, relés de proteção, disjuntores, sinais referentes à situação de tensão, corrente, entre outros.

2.2 Correlação de Eventos

Correlação de eventos pode ser definida de muitas maneiras diferentes, mas, na sua essência mais básica, a correlação de eventos associa eventos uns com os outros de alguma forma útil. A correlação de eventos fornece uma interpretação conceitual de múltiplos eventos, levando à atribuição de um novo valor aos eventos originais.

No contexto da análise de ocorrências de falhas, ela pode ser utilizada para reduzir a quantidade e enriquecer o significado dos eventos mostrados para o operador; podendo ser muito útil para tarefas de diagnóstico de falhas e análise de causa-raiz. Nesse sentido, diferentes tipos de correlação podem ser aplicados em um mesmo conjunto de eventos, onde em cada etapa, é agregado um valor aos eventos originais.

2.2.1 Tipos de Correlação

Existem vários tipos de correlação que podem ser utilizados de acordo com a tarefa desejada. Para a descrição dos tipos mais comuns, considere a seguinte definição: sejam A e B tipos de eventos em um sistema. Denota-se por $P(A)$ a prioridade do evento A , e $P(B)$ a prioridade do evento B .

Os tipos mais comuns são:

Compressão

Compressão é a tarefa de redução de múltiplas ocorrências de um mesmo evento em um único evento. Isso permite que o operador saiba que um evento é recorrente, sem ter que

ver cada caso individualmente, especialmente se o problema já é conhecido, mas os eventos continuam sendo recebidos. Pode ser denotado por:

$$\text{Compressao}[A, A, \dots, A] = A$$

Contagem

Contagem é definida como algo semelhante à compressão: é a substituição de um determinado número de eventos similares em um único evento, cada vez que o número de ocorrências de um determinado tipo de evento ultrapassa um limiar previamente estabelecido. É importante notar que não necessariamente tem que ser o mesmo evento. Pode ser denotado por:

$$\text{Contagem}[n * A] = B$$

Supressão

Supressão é a inibição temporária de um dado tipo de evento, de acordo com algum critério. O critério de supressão pode ser ligado à presença de outros eventos, ao relacionamento temporal, ou à prioridades associadas aos eventos, sendo possível por exemplo, inibir um alarme de baixa prioridade na presença de um evento de alta prioridade. Pode ser denotado por:

$$\text{Supressao}[A, B, P(A) < P(B)] = B$$

Generalização

Generalização é a tarefa de refenciar um evento por sua superclasse correspondente. É uma operação baseada no raciocínio indutivo. O raciocínio indutivo permite a ampliação do alcance do conhecimento, às custas de um aumento da complexidade do problema e da introdução de um certo grau de incerteza no resultado da correlação [20]. Pode ser denotado por:

$$\text{Generalizacao}[A, A \subset B] \Rightarrow B$$

Relacionamento de Causa

Tem o objetivo de determinar algum tipo de relacionamento de causa-efeito entre os eventos. Dados os eventos A e B , a notação $A \rightarrow B$ indica que o evento A causa o evento B . Esse relacionamento de causa pode ser considerado de ordem estrita, isto é, uma relação binária que é irreflexiva e transitiva [11]. Pode ser denotado por:

$$\text{CausaEfeito}[A, B] \Rightarrow A \rightarrow B$$

Relacionamentos de causa-efeito podem ser descritos por modelos de grafos, onde dado um grafo $G(E, C)$, tal que E representa um conjunto de eventos e C descreve os relacionamentos de causa-efeito entre os eventos, uma ligação $(e_i, e_j) \in C$, representa o fato de o evento e_i causar o evento e_j .

Relacionamento Temporal

Tem o objetivo de correlacionar os eventos de acordo com a ordem ou o momento em que foram gerados. Os eventos causados pela mesma falha são susceptíveis de serem observados em determinada ordem ou dentro de um curto período de tempo após a ocorrência da falha. Dessa forma, existe um período de tempo associado a cada possível correlação, e se os eventos ocorrerem durante esse período de tempo, eles podem ser correlacionados.

É possível estabelecer diferentes tipos de correlação temporal entre eventos, como por exemplo:

- evento A seguido por evento B ;
- primeiro evento A desde o último evento B ;
- evento A segue o evento B em dois minutos;
- evento A não foi observado dentro do intervalo de tempo I .

2.3 Análise de Causa-raiz

A análise de causa-raiz tem o propósito de interpretar um conjunto observado de eventos, normalmente indicações de falha, e apontar a origem que está causando esses eventos, i.e.,

onde tudo começou. É um método de resolução de problemas reativo, onde a análise é feita depois de os eventos terem ocorrido, e é baseada na crença de que problemas devem ser resolvidos eliminando-se diretamente a sua causa, ao invés de atacar os seus diversos sintomas.

Seja $\{A, B, C, \dots, N\}$ um conjunto de eventos de um sistema, e $t(N)$ o instante de tempo que o evento N aconteceu, a análise de causa-raiz pode ser denotada por:

$$\text{AnaliseCausaRaiz}[A, B, C, \dots, N] = A, \text{ em que} \\ t(A) < t(B), t(A) < t(C), \dots, t(A) < t(N)$$

No entanto, não é um problema trivial, pois as vezes a causa-raiz pode estar escondida, i.e, não presente nos eventos, e também, pode não existir sincronização nos tempos dos eventos.

Análise de causa-raiz pode fazer parte de um processo maior de correlação de eventos, analisando dependências entre os eventos para detectar quando um evento pode ser explicado por outro. A análise de causa-raiz pode trabalhar com os eventos em sua forma original (da mesma forma que foram recebidos do sistema em monitoramento), assim como nos eventos resultantes de um pré-processamento, feito por alguma outra forma de correlação com o objetivo enriquecer o significado dos eventos, facilitando dessa forma, a tarefa de análise de causa-raiz.

Identificar a causa-raiz de uma ocorrência de falha requer a definição prévia da granularidade da informação desejada. No contexto do nosso trabalho, uma causa-raiz é caracterizada como algum objeto que o operador do sistema possa controlar. Causas reais de uma falha, provenientes, por exemplo, do tempo, como chuva, raio, ou de falhas humanas, estão fora do escopo. Dessa forma, causas-raiz são consideradas sistemáticas e internamente controláveis, sendo internas ao sistema físico, como por exemplo, um dos equipamentos monitorados, tais como linhas de transmissão, transformadores, barramentos, etc.

Capítulo 3

Uma Técnica de Análise de Causa-raiz

Neste capítulo apresentamos uma técnica de análise de causa-raiz para interpretação de ocorrências de falha em sistemas elétricos de potência, onde dado uma ocorrência de falha no sistema elétrico, a técnica proposta é capaz de apontar o equipamento causador da ocorrência (a causa-raiz) e também detalhar a propagação para os demais equipamentos que fazem parte da ocorrência.

A solução proposta é uma técnica baseada em regras parametrizadas que constrói um modelo de propagação de falhas. A partir de uma ocorrência de falha, representada por um conjunto de diagnósticos gerados por um FDS, a técnica correlaciona esses diagnósticos através da aplicação sistemática de regras que irão identificar a causa-raiz, e também, relacionamentos de causa-efeito entre os diagnósticos, construindo um modelo de propagação. O modelo de propagação de falhas construído contém, ao final do processo, o resultado esperado da análise de causa-raiz: a causa-raiz da ocorrência e sua propagação.

A Figura 3.1 ilustra o processo ao qual a técnica está inserida. A rede elétrica fornece os eventos para um FDS, que podem ser alarmes, sinalizações de abertura de disjuntor, entre outros. O FDS correlaciona os eventos para gerar uma lista de diagnósticos de falha. A lista de diagnósticos é submetida à técnica de análise de causa-raiz, que fornece o resultado detalhado da análise para o operador do sistema.

Trabalhar com um conjunto de eventos previamente tratados e correlacionados permite que a técnica seja pontual na resolução do problema abordado, pois eventuais problemas com os eventos que chegam da rede elétrica, como ruídos, excesso de eventos ou falta de eventos, podem ser resolvidos antes da análise de causa-raiz. Além disso, existe a prévia



Figura 3.1: Processo de interpretação de uma ocorrência de falha no sistema elétrico

interpretação dos eventos resultando em um número reduzido de diagnósticos, onde cada diagnóstico reflete a informação de muitos eventos.

No processo descrito na Figura 3.1, o papel do FDS é reduzir o número e enriquecer o significado dos eventos que chegam da rede elétrica, podendo realizar diferentes tipos de correlação. O FDS deve gerar diagnósticos para cada equipamento com falha na ocorrência, que contenham em sua estrutura informações detalhadas, como por exemplo, a localização do defeito, os sistemas de proteção atuados, entre outras. Exemplos de equipamentos são linhas, barramentos, transformadores e reatores.

Nas subseções seguintes formalizamos o problema, apresentamos os requisitos que a solução deve satisfazer para que seja considerada aplicável aos sistemas elétricos e tenha sucesso em seus resultados, e detalhamos a técnica de análise de causa-raiz proposta. Apresentamos o algoritmo utilizado, e por fim, um exemplo de aplicação da técnica.

3.1 Formalização do Problema

Seja $D = \{d_1, d_2, d_3, \dots, d_n\}$ uma lista de diagnósticos que representa uma ocorrência de falha no sistema, onde d_i , $1 \leq i \leq n$, é uma tupla com os seguintes atributos: $d_i = (t_i, e_i, tipo_i, desc_i)$.

- t_i representa o instante de tempo em que ocorreu o diagnóstico, onde $t_1, t_2, t_3, \dots, t_n \in [0, k]$, indica que os diagnósticos aconteceram dentro de um intervalo de tempo k ;
- e_i representa o equipamento onde ocorreu a falha;
- $tipo_i$ especifica o tipo do equipamento;

- $desc_i$ representa a descrição do diagnóstico;

A Tabela 4.2 contém um exemplo de uma lista D , representando uma ocorrência de falha em subestações do Centro Regional de Operações de Sistema Leste (CROL) da CHESF.

$d_1 = (19:11:49; 04S3\text{-MSI/RLD}; \text{LINHA}; \text{DESARME TERMINAL MSI, ATUAÇÃO DA PROTEÇÃO DE SEGUNDA ZONA})$
$d_2 = (19:11:49; 04S4\text{-MSI/RLD}; \text{LINHA}; \text{DESARME TERMINAL MSI, ATUAÇÃO DA PROTEÇÃO DE SEGUNDA ZONA})$
$d_3 = (19:11:49; 04S5\text{-MSI/RLD}; \text{LINHA}; \text{DESARME TERMINAL MSI, ATUAÇÃO DA PROTEÇÃO DE SEGUNDA ZONA})$
$d_4 = (19:12:33; \text{PEN}; \text{SUBESTAÇÃO}; \text{BLACKOUT PEN})$
$d_5 = (19:12:33; \text{RLD}; \text{SUBESTAÇÃO}; \text{BLACKOUT RLD})$

Tabela 3.1: Exemplo de diagnósticos para uma ocorrência de falha

A técnica recebe como entrada a lista D , e como saída da técnica, deseja-se encontrar uma árvore $A_{CR} = (V_{CR}, E_{CR})$, onde V_{CR} é um conjunto de diagnósticos, e E_{CR} é o conjunto das relações de causa-efeito entre os diagnósticos. Uma aresta $(v_i, v_j) \in E_{CR}$ indica que o diagnóstico correspondente em v_i causa o diagnóstico correspondente em v_j . O nó raiz de A_{CR} revela a causa-raiz da ocorrência. O conjunto V_{CR} pode ser representado por $V_{CR} = D \cup D'$, onde D' pode representar:

- um conjunto vazio, nos casos onde a causa-raiz é identificada entre os diagnósticos de entrada, ou seja, a causa-raiz é um dos elementos do conjunto D ;
- um conjunto de um elemento, identificado como causa-raiz, nos casos onde a causa-raiz não está presente no conjunto de entrada D .

Um vértice da árvore também pode ser representado por um conjunto de diagnósticos, sendo uma aresta representada por $(\{v_i, \dots, v_k\}, \{v_j, \dots, v_m\}) \in E_{CR}$. A Figura 3.2 ilustra uma árvore A_{CR} composta por 6 diagnósticos, como resultado esperado para os diagnósticos da Figura 4.2. Na árvore, um novo diagnóstico $d_6 = (; 04BP\text{-RLD}; \text{BARRA}; \text{DEFEITO})$ é indicado como causa-raiz da ocorrência de falha, causando diretamente os diagnósticos d_1, d_2 e d_3 , que por sua vez, juntos causam diretamente o diagnóstico d_5 , e este causa diretamente o diagnóstico d_4 .

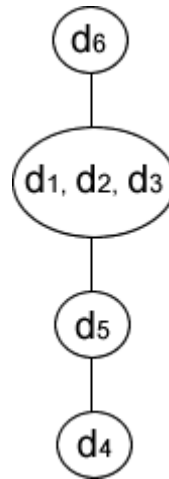


Figura 3.2: Exemplo de resultado esperado da técnica de análise de causa-raiz

3.2 Requisitos da Solução

A técnica proposta deve satisfazer a uma série de requisitos fundamentais para garantir sua viabilidade e obter a análise desejada. Os requisitos são:

1. **Análise em tempo real:** a análise deve auxiliar o operador no instante imediatamente após a ocorrência de falha chegar ao sistema. Segundo Koene e Vedam [13], estudos mostraram que a taxa máxima de alarmes que operadores podem ler, é equivalente a um alarme a cada dois segundos. Isso considerando operadores qualificados e familiarizados com o conteúdo das mensagens de alarme. Dessa forma, consideramos um intervalo de tempo entre um a dois segundos um tempo aceitável para que a técnica apresente seus resultados;
2. **Adaptável a mudanças de topologia:** Uma rede elétrica é um sistema mutável, em constante evolução, e está sujeita a alterações em sua topologia, como, por exemplo, a inclusão de novas linhas e trafos. Dessa forma, a técnica deve se ajustar às mudanças da forma mais automática possível e trabalhar em conformidade com o sistema elétrico, sem comprometer a qualidade da análise;
3. **Escalabilidade:** Situações de falha podem atingir grandes proporções do sistema elétrico, envolvendo dezenas de componentes. Para garantir sua eficiência, a técnica deve ter complexidade aceitável para grandes ocorrências, que envolvam dezenas de equipamentos distribuídos em diferentes subestações, apresentando resultados em

- tempo hábil para o operador realizar seu trabalho;
4. Identificar múltiplas causas-raiz: Em algumas ocorrências, existe a possibilidade de que a explicação mais coerente da falha envolva em sua origem mais de um componente. Dessa forma, a técnica deve considerar essa possibilidade;
 5. Lidar com dessincronização de tempo: Os eventos que chegam da rede elétrica nem sempre estão com os dados temporais corretos, e o tempo de uma subestação pode não estar sincronizado com o de outra subestação. Dessa forma, a técnica deve ser capaz de lidar com os dados temporais dessincronizados.
 6. Causa-raiz implícita: Em algumas ocorrências, é possível que a causa-raiz não esteja presente nos diagnósticos que representam a ocorrência. Dessa forma, a técnica deve ser capaz de identificar a causa-raiz, mesmo que seja implícita.

3.3 Solução Proposta

A solução proposta é uma técnica baseada em regras parametrizadas que visam identificar a causa-raiz da ocorrência e relacionamentos de causa-efeito entre os diagnósticos da ocorrência. As regras são ditas parametrizadas pois não fazem referência a um equipamento específico do sistema, mas sim, quando necessário, ao tipo do equipamento, como por exemplo, linha de transmissão, barramento e transformador. Dessa forma, uma única regra pode ser aplicada a dezenas de equipamentos do mesmo tipo, reduzindo a necessidade de levantamento de regras específicas para cada equipamento do sistema elétrico. A utilização desse tipo de regra traz grandes vantagens ao processo:

- Permite que a técnica seja adaptável a alterações na topologia do sistema, como inclusão/remoção de equipamentos, pois as regras não fazem referências aos equipamentos diretamente.
- Contribui para que a análise apresente o resultado em um tempo reduzido, pois o processamento será feito em um número reduzido de regras (se comparadas com um conjunto semanticamente equivalente de regras não parametrizadas).

- Contribui para a escalabilidade da técnica, pois uma mesma regra pode ser aplicada a todas as ocorrências que se enquadrem na regra, independentemente de sua localização.

O conjunto de regras é dividido em três tipos de regras: *regras de causa-raiz*, *regras de relacionamento e propagação* e *regras de construção de árvore*. Cada tipo possui uma finalidade distinta: as *regras de causa-raiz* buscam identificar a causa-raiz da ocorrência analisando todos os diagnósticos em conjunto; as *regras de relacionamento e propagação* buscam construir um modelo de propagação de falhas com os possíveis relacionamentos de causa-efeito entre os pares de diagnósticos; e as *regras de construção de árvore* representam heurísticas de conversão do modelo de propagação de falhas para uma árvore sintaticamente válida.

As *regras de causa-raiz* representam o conhecimento especialista do domínio de sistemas elétricos e seguem a estrutura definida na Tabela 3.2, onde te_i representa um tipo de equipamento, d_i um diagnóstico associado a esse tipo de equipamento, e $condição(d_i)$ avalia parâmetros do diagnóstico e aspectos da topologia do sistema elétrico. Em $condição(d_i)$ pode-se verificar, por exemplo, se atuou uma determinada proteção, ou se falhou um disjuntor, se foi o primeiro diagnóstico da ocorrência, se está conectado a um outro determinado equipamento, se o equipamento está desenergizado, entre outros tipos de verificações. Essas regras podem identificar um dos diagnósticos recebidos como a causa-raiz da ocorrência, bem como identificar um novo diagnóstico como causa-raiz da ocorrência. Isso pode ocorrer, por exemplo, quando a falha está em um equipamento que não possui um sistema de proteção inerente ao mesmo, e dessa forma, não foi gerado um diagnóstico correspondente.

Regras de Causa-raiz

1. **SE** $existe(te_1)$ e $condição(d_1)$ [$e existe(te_2)$ e $condição(d_2)$] [$e existe(te_3)$ e $condição(d_3)$]... [$e existe(te_n)$ e $condição(d_n)$]
ENTÃO d_k é causa-raiz.
-

Tabela 3.2: Estrutura das regras de causa-raiz

As *regras de relacionamento e propagação* também representam o conhecimento especialista do domínio de sistemas elétricos, e utilizam as estruturas definidas na Tabela 3.3. As regras que seguem a primeira estrutura definem um relacionamento de causa-efeito entre

dois diagnósticos. Na segunda estrutura, as regras apenas identificam que deve existir um relacionamento entre dois diagnósticos, porém não conseguem identificar quem é a causa ou a consequência. Essas devem preceder as regras que seguem a terceira estrutura, que são regras que analisam o par de diagnósticos relacionados, previamente identificados, tentando identificar qual dos diagnósticos é a causa e qual é a consequência.

Regras de Relacionamento e Propagação

1. **SE** $\text{existe}(te_1)$ e $\text{existe}(te_2)$ e $\text{condição}(d_1)$ e $\text{condição}(d_2)$
ENTÃO d_1 causou d_2

 2. **SE** $\text{existe}(te_1)$ e $\text{existe}(te_2)$ e $\text{condição}(d_1)$ e $\text{condição}(d_2)$
ENTÃO $\text{relacionar}(d_1, d_2)$

 3. **SE** $\text{existeRelacionamento}(d_1, d_2)$ e $\text{condição}(d_1)$ e $\text{condição}(d_2)$
ENTÃO d_1 causou d_2
-

Tabela 3.3: Estruturas das regras de relacionamento e propagação

As regras de construção de árvore analisam o modelo de propagação de falhas gerado pelos dois conjuntos de regras, descritos anteriormente, levando em consideração apenas informações sobre a estrutura sintática do modelo, e, basicamente, aplicam heurísticas que podem, por exemplo, remover ciclos e agrupar nós para manter a estrutura válida de uma árvore. O modelo de propagação de falhas adotado como resultado é uma árvore, pois é uma estrutura naturalmente auto-explicativa e de fácil entendimento, devido à sua representação hierárquica do conhecimento, que não requer muito esforço para a sua interpretação.

A topologia deve ser fornecida à técnica para que possa ser consultada sempre que uma regra requisitar informações sobre a conectividade dos elementos envolvidos na ocorrência. As informações sobre a topologia devem ser obtidas em uma instância da topologia vigente no momento anterior à ocorrência, dessa forma, a técnica sempre estará baseada na topologia vigente. Essa garantia de obtenção de informações atualizadas da topologia é um processo externo à técnica, sendo um pré-requisito para sua aplicação.

3.3.1 Algoritmo

A técnica define um processo sistemático de aplicação de regras para a construção do modelo de propagação de falhas, representado por uma estrutura de árvore. A aplicação do conjunto

de regras é realizada em três etapas consecutivas. Na primeira etapa, aplicam-se as *regras de causa-raiz*. Uma vez identificada a causa-raiz, tenta-se construir, na segunda etapa, um modelo de propagação de falhas aplicando-se as *regras de relacionamento e propagação*. Por fim, na terceira etapa, a técnica avalia o modelo gerado, convertendo-o para uma estrutura de árvore com a aplicação das *regras de construção de árvore*. Na Figura 3.3 é apresentado esse processo, onde a técnica recebe como entrada uma lista D de diagnósticos, e após a execução das etapas, apresenta como saída uma árvore A_{CR} .

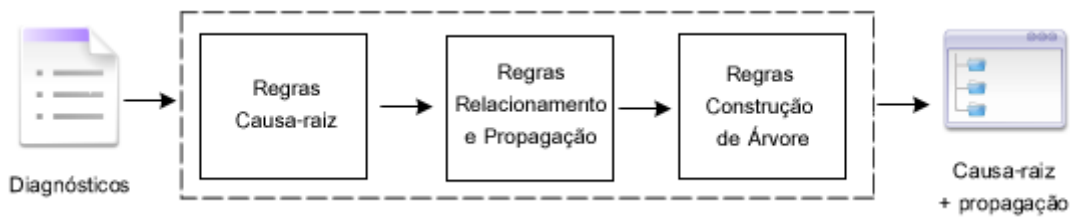


Figura 3.3: Processo de análise de causa-raiz

O algoritmo 3.1 apresenta o procedimento detalhado da técnica proposta. Inicialmente o modelo de propagação é um grafo não-conectado contendo os elementos que representam os diagnósticos da ocorrência. Dessa forma, ao receber os dados de entrada, um novo grafo G_{CR} é criado e inicializado com os vértices correspondentes aos diagnósticos de entrada nas linhas 3 a 5. O atributo $éCausaRaiz$ de cada diagnóstico é inicializado como falso na linha 5, indicando que, inicialmente, não existe causa-raiz definida. Esse grafo passa por diversas transformações à medida que se encontra uma regra aplicável ao modelo.

Regras de causa-raiz são aplicadas com o intuito de identificar quais desses elementos podem ser causa-raiz. A linha 7 inicializa uma fila Q com todas as *regras de causa-raiz*, dando início ao *loop* das linhas 8 a 15, que testa cada uma das regras, e quando uma causa-raiz é encontrada, o atributo $éCausaRaiz$ do vértice correspondente no grafo é alterado para verdadeiro. Caso o vértice não exista no grafo G_{CR} , é acrescentado ao grafo na linha 11. A remoção das regras do conjunto Q no método `ExtrairAplicarRegra` garante o fim do *loop*. O método `ExtrairAplicarRegra`, utilizado para ler a fila Q de regras, aplica uma regra e a remove da fila. O método tem diferentes tipos de retorno de acordo com o tipo de regra inicializada na fila. Todas as regras seguem o formato *SE <condição> ENTÃO <ação>*, onde em *condição* é feita a maior parte do processamento nos dados de entrada. De maneira geral, cada regra percorre o conjunto de diagnósticos de entrada para encontrar

um padrão definido.

Se nenhuma causa-raiz for encontrada, não faz sentido tentar montar seu modelo de propagação. Dessa forma, o método `naoExisteCausaRaiz` é utilizado para fazer esta verificação nas linhas 17 a 19, finalizando o algoritmo se o seu retorno for verdadeiro.

A seguir, as arestas que podem compor o grafo G_{CR} são encontradas nas linhas 20 a 26, onde a fila Q agora é inicializada com *regras de relacionamento e propagação* que identificam relações entre os vértices do grafo G_{CR} . Cada aresta possui uma direção α associada.

Agora com o grafo conectado e direcionado, as *regras de construção de árvore* são aplicadas para transformá-lo em árvore (linhas 27 a 30). Ao final do processo, temos uma árvore onde o nó raiz representa a causa-raiz e cada nível da árvore detalha as relações de causa-efeito entre os elementos da árvore.

Algoritmo 3.1: Algoritmo de Análise de Causa-raiz

Entrada: Entrada (D)
Saída: Saída (A_{CR})

- 1 $V[G_{CR}] \leftarrow \emptyset$
- 2 $E[G_{CR}] \leftarrow \emptyset$
- 3 **para todo** diagnóstico $d \in D$ **faça**
- 4 $éCausaRaiz[d] \leftarrow false$
- 5 $V[G_{CR}] \leftarrow V[G_{CR}] \cup d$
- 6 **fim**
- 7 $Q \leftarrow$ Regras-CausaRaiz
- 8 **enquanto** $Q \neq \emptyset$ **faça**
- 9 $v \leftarrow$ ExtrairAplicarRegra (Q, G_{CR})
- 10 **se** $v \neq null$ **então**
- 11 **se** $v \notin V[G_{CR}]$ **então**
- 12 $V[G_{CR}] \leftarrow V[G_{CR}] \cup v$
- 13 **fim**
- 14 $éCausaRaiz[v] \leftarrow true$
- 15 **fim**
- 16 **fim**
- 17 **se** $naoExisteCausaRaiz(V[G_{CR}])$ **então**
- 18 **retorna**
- 19 **fim**
- 20 $Q \leftarrow$ Regras-Relacionamento-Propagação
- 21 **enquanto** $Q \neq \emptyset$ **faça**
- 22 $C \leftarrow$ ExtrairAplicarRegra (Q, G_{CR})
- 23 **para cada** aresta $(u, v, \alpha) \in C$ **faça**
- 24 $E[G_{CR}] \leftarrow E[G_{CR}] \cup (u, v, \alpha)$
- 25 **fim**
- 26 **fim**
- 27 $Q \leftarrow$ Regras-Árvore
- 28 **enquanto** $Q \neq \emptyset$ **faça**
- 29 $G_{CR} \leftarrow$ ExtrairAplicarRegra (Q, G_{CR})
- 30 **fim**
- 31 $A_{CR} \leftarrow G_{CR}$
- 32 **retorna** A_{CR}

As vantagens desse processo são:

- Possibilita que a causa-raiz possa ser representada por mais de um equipamento, permitindo assim a identificação de múltiplas causas para uma ocorrência, pois mais de uma *regra de causa-raiz* pode ser satisfeita. Nesse caso, os elementos correspondentes no modelo podem, por exemplo, serem agrupados em um único nó raiz da árvore, para manter a estrutura válida de uma árvore.
- Uma vez identificada a causa-raiz, é capaz de apresentar os diagnósticos da ocorrência em uma seqüência de causa-efeito, indicando quem ocorreu antes, depois, ou simultaneamente a um determinado diagnóstico.
- Mesmo que não existam regras suficientes para identificar todos os relacionamentos de causa-efeito entre os diagnósticos da ocorrência, o modelo final pode apresentar um resultado parcial envolvendo parte dos diagnósticos, equivalente à cobertura das regras.
- É naturalmente capaz de lidar com ruídos nos diagnósticos de entrada, onde por ruído entende-se que é um diagnóstico isolado que aconteceu em outra parte do sistema, porém no mesmo instante de tempo da ocorrência sendo analisada. Embora esse diagnóstico isolado possa fazer parte dos dados de entrada, certamente não existirá uma regra que relacione esse diagnóstico com nenhum outro diagnóstico da ocorrência, ficando de fora do resultado final.

3.4 Considerações Finais

Este capítulo apresentou a técnica de análise de causa-raiz proposta neste trabalho. A técnica analisa diagnósticos gerados por um FDS, que representam uma ocorrência de falha no sistema. A aplicação sistemática de regras parametrizadas constrói um modelo de propagação de falhas capaz de fornecer o resultado completo da análise de causa-raiz: a causa-raiz da ocorrência e sua propagação para os demais elementos. O resultado é expresso em uma árvore, onde o nó raiz indica a causa-raiz da ocorrência, e os níveis da árvore revelam as relações de causa-efeito entre os equipamentos envolvidos.

As regras são parametrizadas, pois não fazem referência a equipamentos específicos do sistema, dessa forma, alterações na topologia não afetam o seu processamento. Além disso, para cada ocorrência que precise ser analisada, a técnica trabalha com a topologia vigente para ter as informações sempre atualizadas.

As regras são divididas em três grupos com objetivos distintos(*regras de causa-raiz*, *regras de relacionamento e propagação* e *regras de construção de árvore*), permitindo que o processo de aplicação das regras possa identificar múltiplas-causas para uma ocorrência, e também construir um modelo de causa-efeito a partir da causa-raiz identificada.

A técnica apresenta algumas limitações inerentes dos sistemas baseados em regras, limitações estas, que não puderam ser contornadas no contexto desse trabalho, como inabilidade de aprender a partir de experiência, e de resolver problemas que não foram previamente definidos; o levantamento do conhecimento, obtido normalmente através de entrevistas com os especialistas, é um processo lento e susceptível a conter erros. Outra limitação é a incapacidade de tratar dados incorretos.

No próximo capítulo apresentamos um estudo de caso: um protótipo desenvolvido que implementa a técnica proposta, trabalhando em conjunto com um sistema de diagnóstico de falhas utilizado na CHESF e um conjunto de regras elaboradas a partir dessa integração.

Capítulo 4

Smart Root-Cause Analyzer - Um Estudo de Caso

Neste capítulo apresentamos um estudo de caso realizado no contexto da CHESF, onde desenvolvemos um protótipo que implementa a técnica proposta e levantamos um conjunto de regras parametrizadas com especialistas da CHESF. Esse estudo de caso tem o objetivo de possibilitar a avaliação da técnica proposta nesse trabalho.

O protótipo desenvolvido, chamado *Smart Root-Cause Analyzer (SmartRCA)*, foi integrado a um sistema de diagnóstico de falhas da CHESF, chamado *Smart Alarms*. O *Smart Alarms* é o sistema responsável por gerar os diagnósticos que serão utilizados na análise de causa-raiz.

O conjunto de regras utilizadas pelo protótipo foi obtido em reuniões e workshops realizados com especialistas em supervisão e controle de sistemas de geração e transmissão de energia elétrica da CHESF. Participaram desse processo três especialistas da CHESF (Antônio Sérgio de Araújo, Jozimar Ferreira Durand e Frutuoso Gusmao Amorim), um professor do DSC-UFCG (Jorge César Abrantes de Figueiredo), um pesquisador (Eloi Rocha Neto) e uma aluna de Mestrado em Informática da UFCG (Stéfani Silva Pires). O processo de levantamento das regras, implementação e a validação das regras teve duração de aproximadamente nove meses. Foram levantadas ao todo quinze regras, das quais nove são regras de causa-raiz e seis são regras de relacionamento. As regras abrangem falhas em linhas de transmissão, barramentos e transformadores, e podem ser encontradas no Apêndice B. O processo de obtenção das regras foi difícil, sendo que um dos maiores problemas estava na

falta de uma base de cenários representativa que pudesse validar cada regra, uma vez que o levantamento das regras foi baseado nos cenários de falha vivenciados pelos especialistas que fizeram parte do processo.

Neste capítulo apresentamos resumidamente o *Smart Alarms*, com sua arquitetura e estrutura de diagnósticos. Apresentamos uma visão geral do protótipo *SmartRCA* e sua integração com o *Smart Alarms*, bem como detalhes do seu desenvolvimento. Por fim, ilustramos um exemplo de aplicação do protótipo.

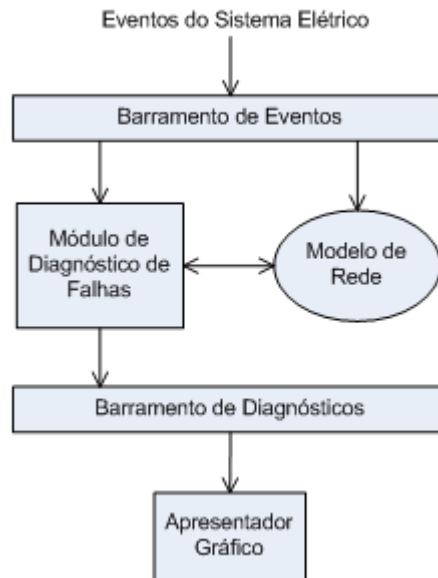
4.1 Sistema de Diagnóstico de Falhas

Nesta seção apresentamos o *Smart Alarms*, um sistema de tratamento automático de eventos, utilizado no diagnóstico de alarmes da rede elétrica da CHESF.

O *Smart Alarms* [10] implementa uma técnica híbrida de correlação de eventos, combinando o raciocínio baseado em regras com o raciocínio baseado em modelos. Com sua arquitetura baseada em componentes, o sistema mantém um modelo da rede elétrica e um módulo de diagnóstico de falhas. O modelo da rede é conceitualmente representado por um grafo, onde os vértices representam os elementos do sistema e seus estados correntes, e as arestas representam a existência de conectividade física entre eles. O módulo de diagnóstico de falhas efetua possíveis diagnósticos de falhas no modelo da rede, utilizando uma base de regras definidas pelos especialistas da CHESF. O seu funcionamento consiste em analisar o modelo da rede com base nos eventos que chegam da rede elétrica para efetuar o diagnóstico de problemas na rede. A Figura 4.1 ilustra a arquitetura do sistema.

Os eventos do sistema elétrico são disponibilizados para o *Smart Alarms* através de um barramento de eventos. O módulo de diagnóstico de falhas e o modelo da rede recebem esses eventos, e a análise é feita para gerar os possíveis diagnósticos, que por sua vez, são inseridos em um barramento de diagnósticos. Por fim, os diagnósticos são exibidos em um apresentador gráfico para o operador do sistema.

No módulo de diagnóstico de falhas está o correlator de eventos, que é o responsável pelo diagnóstico propriamente dito. É no correlator de eventos que é implementada a técnica híbrida de correlação de eventos. A estrutura dos diagnósticos gerados pelo *Smart Alarms* possui as seguintes partes:

Figura 4.1: Arquitetura do *Smart-One*

- o tempo do diagnóstico;
- o tipo do diagnóstico;
- o tipo do equipamento associado;
- a identificação do equipamento associado;
- a localização do defeito;
- se houve religamento automático;
- o conjunto das proteções;
- se houve falha de disjuntor;
- se houve atuação indevida da proteção.

O Smart Alarms mantém sempre uma instância da topologia atualizada. A ocorrência de um evento no barramento de eventos informando uma mudança de estado em um dos equipamentos da rede atualiza conseqüentemente o grafo da rede. Conceitualmente um grafo, a topologia é armazenada pela ferramenta em um arquivo XML (Extensible Markup Language), contendo todas as informações sobre a conectividade dos equipamentos da rede elétrica.

4.2 SmartRCA - Projeto e Implementação

O *SmartRCA* é um protótipo desenvolvido com o objetivo de tornar possível a avaliação da técnica com cenários reais, dessa forma ele foi projetado para trabalhar em conjunto com o sistema *Smart Alarms*, descrito previamente.

A Figura 4.2 ilustra uma visão geral dos principais componentes do protótipo.

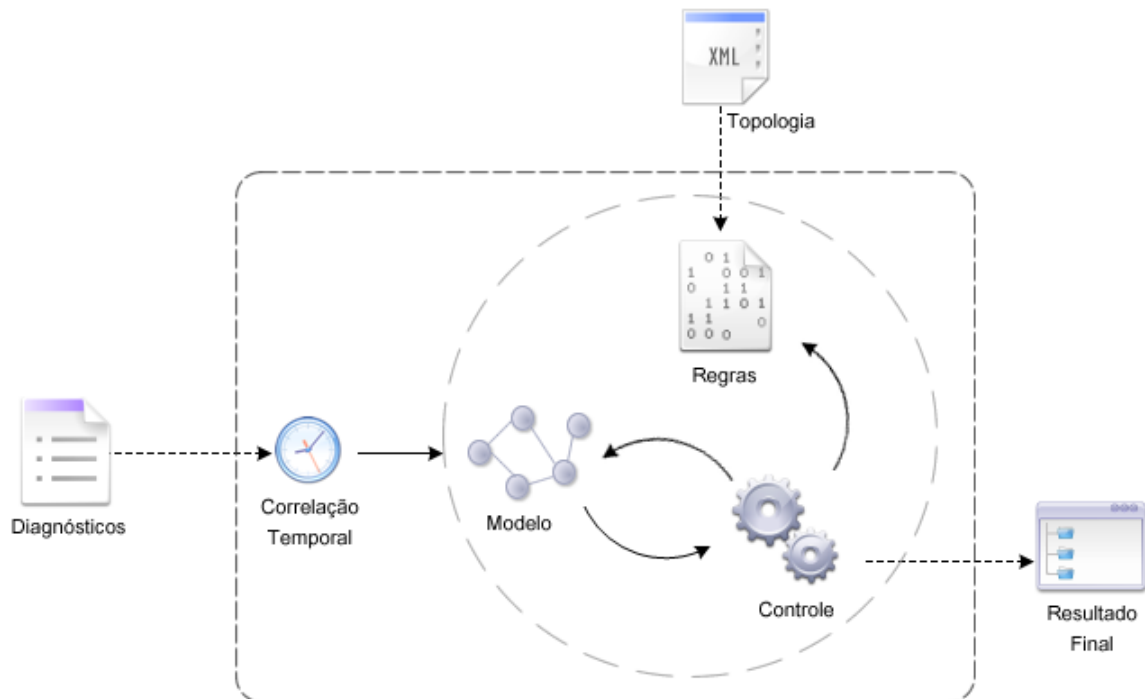


Figura 4.2: Visão Geral do *SmartRCA*

O *SmartRCA* recebe todos os diagnósticos emitidos pelo *SmartAlarms*. Para que um diagnóstico seja analisado pela técnica de causa-raiz, ele deve fazer parte de uma ocorrência válida. Consideramos uma ocorrência válida um conjunto de diagnósticos que aconteceram dentro de um intervalo de tempo pré-definido. Dessa forma, para saber quando existe uma ocorrência válida, é preciso realizar uma correlação temporal no conjunto de diagnósticos gerados pelo *Smart Alarms*, para extrair a parte equivalente à uma ocorrência. Um parâmetro configurável no *SmartRCA* indica o intervalo de tempo que deve ser considerado. Para o estudo de caso, utilizamos o valor de um minuto. Este valor foi indicado pelos especialistas da CHESF.

Dado uma ocorrência válida, a técnica é ativada com a criação do modelo de propagação

de falhas, dando início a um processo entre os componentes *Modelo*, *Controle* e *Regras*. Nesse processo, o *Controle*, como o próprio nome indica, controla a execução da análise de causa-raiz, gerenciando a execução das regras e as atualizações do modelo de propagação de falhas. Ele é o responsável pela maior parte do algoritmo proposto neste trabalho, descrito na Seção 2.2.1. O *Controle* é responsável também por fornecer o resultado final da análise. Para isto, possui um notificador de causa-raiz que irá avisar quando os resultados estiverem prontos para serem exibidos para o operador do sistema.

Em *Regras* se encontram todas as regras utilizadas pelo protótipo. A execução de cada regra pode fazer alterações no modelo, como por exemplo, incluindo arestas ou vértices. As regras podem precisar de informações sobre a topologia do sistema elétrico. O *Smart Alarms* mantém uma instância da topologia do sistema atualizada, dessa forma, para evitar duplicação desnecessária de dados e simplificar a implementação do protótipo, o *SmartRCA* implementa uma interface de comunicação com a instância da topologia armazenada no *Smart Alarms*. Sendo assim, essa interface provê todas as informações necessárias para as regras.

Para ser notificado que um diagnóstico foi gerado pelo *Smart Alarms*, o *SmartRCA* implementa uma interface de comunicação com o notificador de diagnósticos (*DiagnosticNotifier*) do *Smart Alarms*. Da mesma forma, para que o apresentador gráfico utilizado pelo *Smart Alarms* possa ser notificado que existe uma análise feita pelo *SmartRCA* esperando para ser exibida para o operador, ele precisa implementar uma interface de comunicação com o notificador de causa-raiz (*RootCauseNotifier*) do *SmartRCA*.

A Figura 4.3 ilustra esse processo. O *SmartModel* é o módulo responsável por fornecer a topologia do sistema elétrico ao *SmartAlarms* e o *SmartViewer* é o módulo responsável pela visualização textual e gráfica dos diagnósticos sinalizados pelo *SmartAlarms*, assim como a visualização dos resultados da análise de causa-raiz. Ambos os módulos são acessíveis remotamente através de RMI.

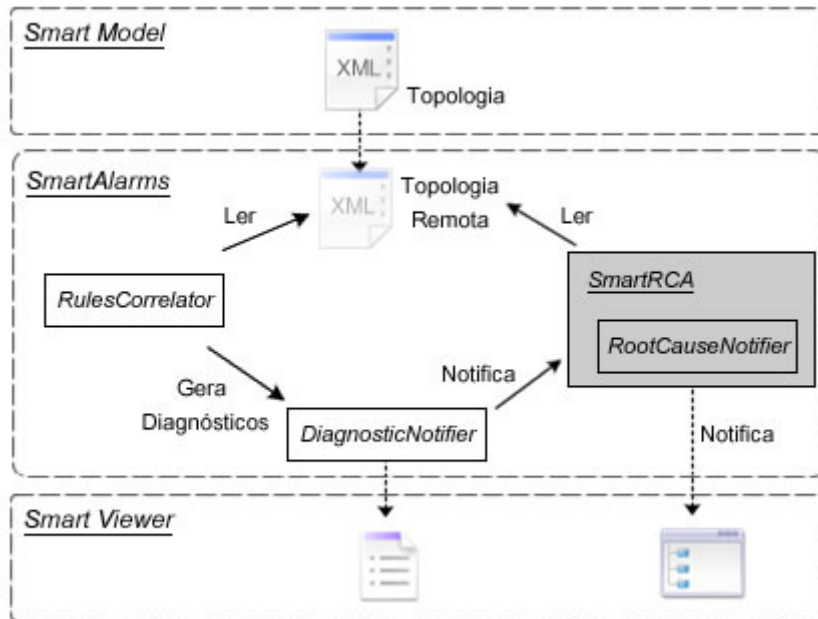


Figura 4.3: Arquitetura Geral

4.2.1 Organização do protótipo

O protótipo foi implementado em Java e organizado em pacotes de *software* de acordo com suas funcionalidades. A Figura 4.4 apresenta o diagrama de pacotes do protótipo desenvolvido. Na Tabela 4.1 estão as descrições dos pacotes. Apresentamos, a seguir os diagramas de classes dos pacotes *rootCauseAnalysis* e *rules*, para um melhor entendimento do processo.

Na Figura 4.5 podemos observar o diagrama de classes do pacote *rootCauseAnalysis* com a representação das classes e seus métodos mais relevantes. A classe *RootCauseAnalysis-Generator* é responsável pela execução e controle da análise, sendo também o ponto de entrada dos diagnósticos e saída dos resultados da análise. Essa classe mantém uma instância do notificador de causa-raiz, representado pela classe *RootCauseNotifier*, para passar os resultados sempre que a análise de uma ocorrência for finalizada. A classe *RootCauseNotifier*, por sua vez, mantém uma lista de todos os interessados em saber que a análise está pronta, que são os que implementam a interface *RootCauseListener*. Dessa forma, qualquer visualizador gráfico que implemente a interface *RootCauseListener* será avisado.

Pacote	Descrição
rootCauseAnalysis	Responsável pela gerência e execução do processo de análise de causa-raiz, contendo a interface de comunicação com o sistema e a classe com a implementação do algoritmo proposto. Pacote responsável também, pela correlação temporal nos diagnósticos de entrada do sistema
base	Contém as classes que representam o modelo de propagação de falhas, e classes de definição do tipo de diagnóstico.
rules	Contém todas as classes que implementam as regras utilizadas pelo protótipo. Contém também a interface padrão que todas as regras devem seguir.
modelRules	Contém especificamente as classes que implementam as regras de construção do modelo, que são as regras de relacionamento e propagação.
rcRules	Contém as classes que implementam as regras de identificação da causa-raiz.
treeRules	Contém as classes que implementam as regras de transformam o modelo em uma árvore.
topology	Responsável por fornecer as informações necessárias sobre a topologia do sistema.
util	Responsável por fornecer as classes de utilidade geral para todas as outras classes do protótipo.
log	Realiza a persistência das análises realizadas pela técnica.
acceptanceTests	Contém os testes de aceitação da técnica

Tabela 4.1: Descrição dos pacotes que compõem o protótipo

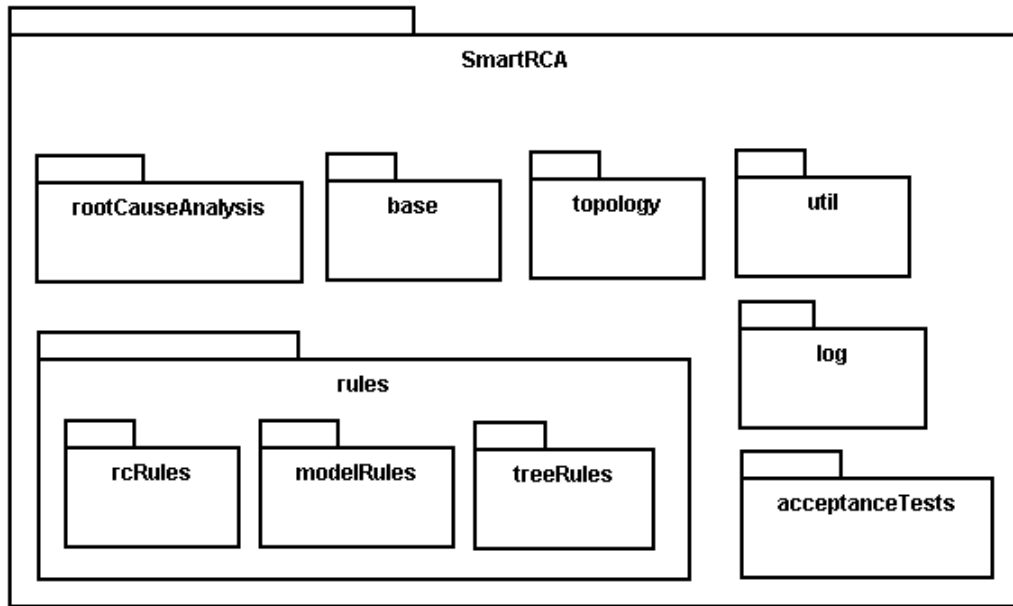
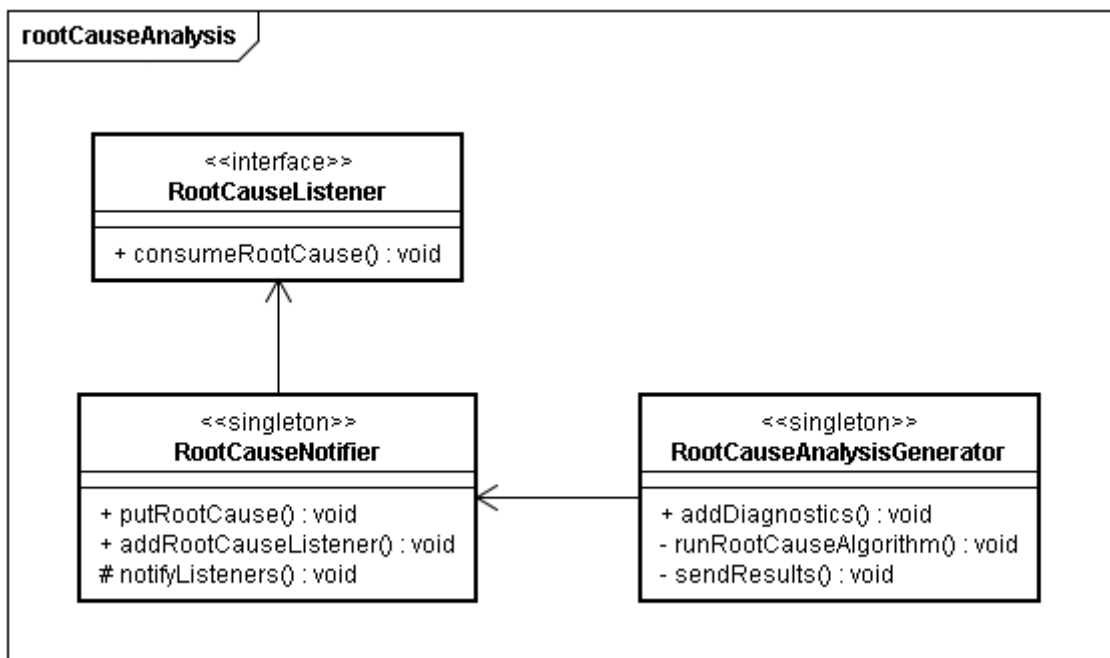
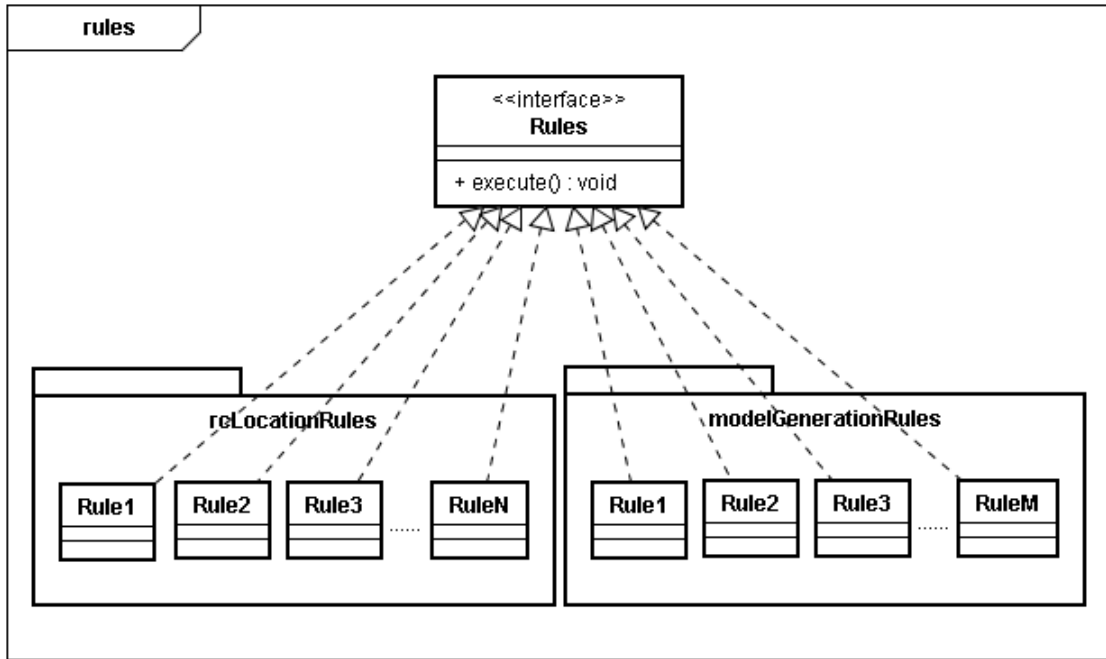


Figura 4.4: Diagrama de pacotes do protótipo

Figura 4.5: Diagrama de classes do pacote *rootCauseAnalysis*

O diagrama de classes do pacote *rules* e seus sub-pacotes pode ser observado na Figura 4.6. Cada regra é descrita por uma classe que implementa a interface *Rules*. A interface requer apenas a padronização da ativação das regras, com o método *execute*.

Figura 4.6: Diagrama de classes do pacote *rules*

4.2.2 Interface da Aplicação

O visualizador gráfico utilizado pelo *Smart Alarms* contém uma interface gráfica para a exibição dos resultados da análise de causa-raiz. Essa interface, onde o operador do sistema pode visualizar a(s) árvore(s) de resultado, foi elaborada e discutida nos *workshops* realizados, e aprovada pelos especialistas da CHESF, os mesmos que participaram da etapa de elaboração das regras. A interface gráfica foi implementada pela equipe de desenvolvimento do projeto *Smart-Two*. A Figura 4.7 mostra como o resultado do protótipo de causa-raiz é exibido para o operador no sistema.

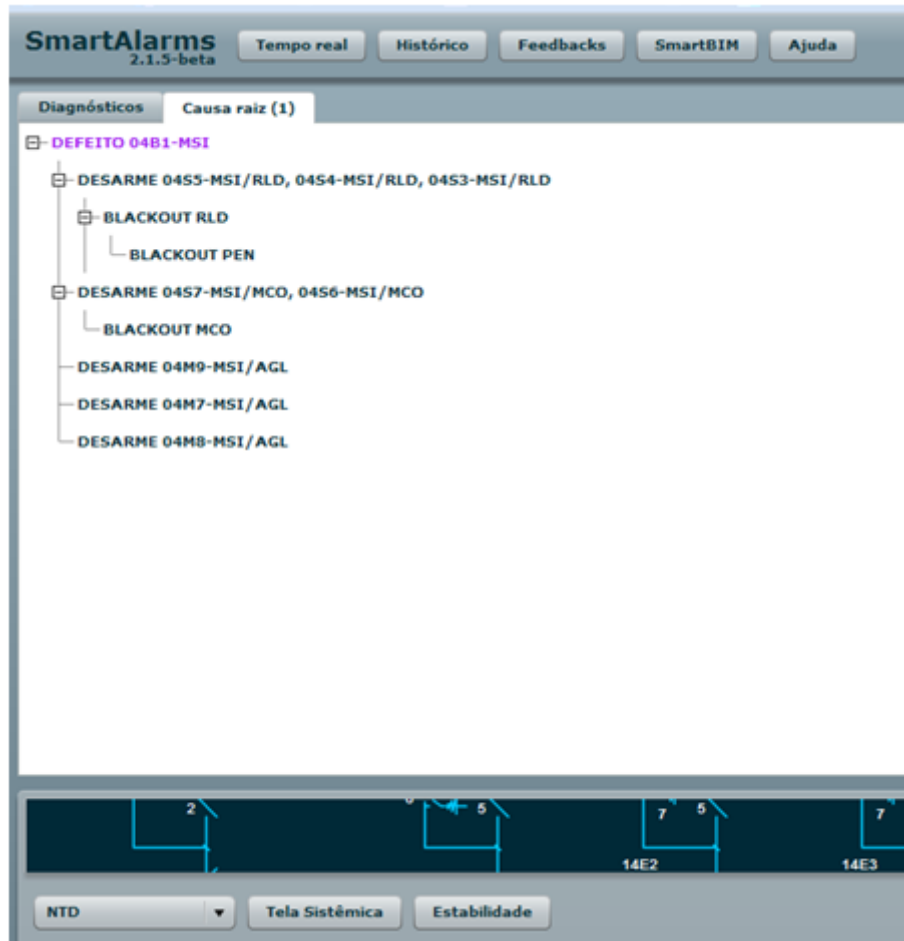


Figura 4.7: Exemplo de tela do sistema com o resultado da análise de causa-raiz

4.3 Exemplo de aplicação do protótipo

Esta seção mostra um exemplo de aplicação do protótipo em um cenário de falha, e detalha o processo de aplicação da técnica para encontrar a causa-raiz e sua propagação. Utilizaremos subestações do Centro Regional de Operação de Sistema Leste (CROL) da CHESF.

Considere uma ocorrência de falha envolvendo as subestações de Messias (MSI), Rio Largo (RLD) e Penedo (PEN). A Figura 4.8 é uma parte de um diagrama unifilar de alto nível que mostra alguns elementos dessas subestações, como barras principais e linhas que as interligam.

Um curto circuito próximo à barra 04BP-RLD provocou o desligamento dos terminais em MSI das linhas 04S3-MSI/RLD, 04S4-MSI/RLD, 04S5-MSI/RLD. Para os operadores

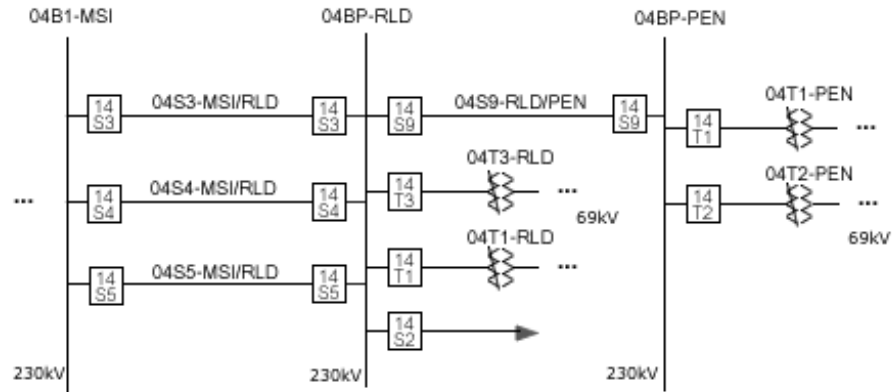


Figura 4.8: Diagrama unifilar simplificado de subestações da Chesf

do sistema, esse curto próximo à barra é considerado um defeito na barra. Sendo este um sistema radial, e como essas linhas são as únicas fontes de energia para a subestação RLD, haverá um blackout em RLD, e conseqüentemente em PEN, que depende apenas de RLD para estar energizada. Nosso objetivo é encontrar um modelo que reflita exatamente isso para o operador do sistema, mostrando que a causa-raiz dessa ocorrência é o defeito na barra, e a seqüência de propagação de seus efeitos nos demais equipamentos.

Considere a seguinte lista D de diagnósticos (ver Tabela 4.2) gerada pelo sistema de diagnóstico de falhas utilizado na CHESF, o *SmartAlarms*, para representar a ocorrência. Na lista D estão presentes apenas os diagnósticos considerados pelo sistema como de alta prioridade, que são os *desarmes* e *blackouts*.

d_1	$(19:11:49; 04S3-MSI/RLD; LINHA; DESARME\ TERMINAL\ MSI, ATUAÇÃO\ DA\ PROTEÇÃO\ DE\ SEGUNDA\ ZONA)$
d_2	$(19:11:49; 04S4-MSI/RLD; LINHA; DESARME\ TERMINAL\ MSI, ATUAÇÃO\ DA\ PROTEÇÃO\ DE\ SEGUNDA\ ZONA)$
d_3	$(19:11:49; 04S5-MSI/RLD; LINHA; DESARME\ TERMINAL\ MSI, ATUAÇÃO\ DA\ PROTEÇÃO\ DE\ SEGUNDA\ ZONA)$
d_4	$(19:12:33; PEN; SUBESTAÇÃO; BLACKOUT\ PEN)$
d_5	$(19:12:33; RLD; SUBESTAÇÃO; BLACKOUT\ RLD)$

Tabela 4.2: Exemplo de diagnósticos para uma ocorrência de falha

O *SmartRCA* processa essa lista de diagnósticos aplicando as regras definidas, para gerar uma árvore com o resultado da análise. No resultado, temos uma árvore onde o nó raiz indica que a causa-raiz é um defeito na barra 04BP-RLD, e os níveis da árvore indicam como a propagação da falha aconteceu: o defeito em 04BP-RLD causou diretamente os desarmes

dos terminais de MSI; em seguida, o desarme dos terminais de MSI causou diretamente o blackout de RLD; e conseqüentemente, após o blackout em RLD, tivemos o blackout em PEN (ver Figura 4.9). É importante observar que, poderíamos dizer apenas que todos os demais diagnósticos são conseqüências da causa-raiz, o que é verdade, porém, essa informação não seria suficiente para mostrar como esses efeitos foram se propagando gradualmente.

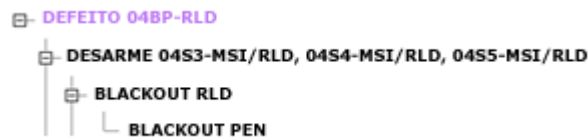


Figura 4.9: Resultado da aplicação da técnica de causa-raiz

A Figura 4.10 detalha a execução do algoritmo implementado pelo protótipo. No primeiro passo o grafo G_{CR} é criado. É um grafo não conectado e seus vértices correspondem aos diagnósticos de entrada. Os demais passos ilustrados na figura indicam as etapas do algoritmo onde o grafo G_{CR} é modificado. O vértice sombreado indica que o atributo *éCausaRaiz* é verdadeiro. Todas as regras de causa-raiz são testadas (etapas não ilustradas na figura) e uma regra é aplicada encontrando uma causa-raiz que não faz parte dos diagnósticos de entrada, resultando em (b) com um novo diagnóstico $d_6 = (; 04BP-RLD ; DEFEITO 04BP-RLD)$. Em seguida as regra de relacionamento e propagação são aplicadas nas etapas de (c) a (j), e finalmente, o grafo é transformado em uma árvore nas etapas (k) e (l).

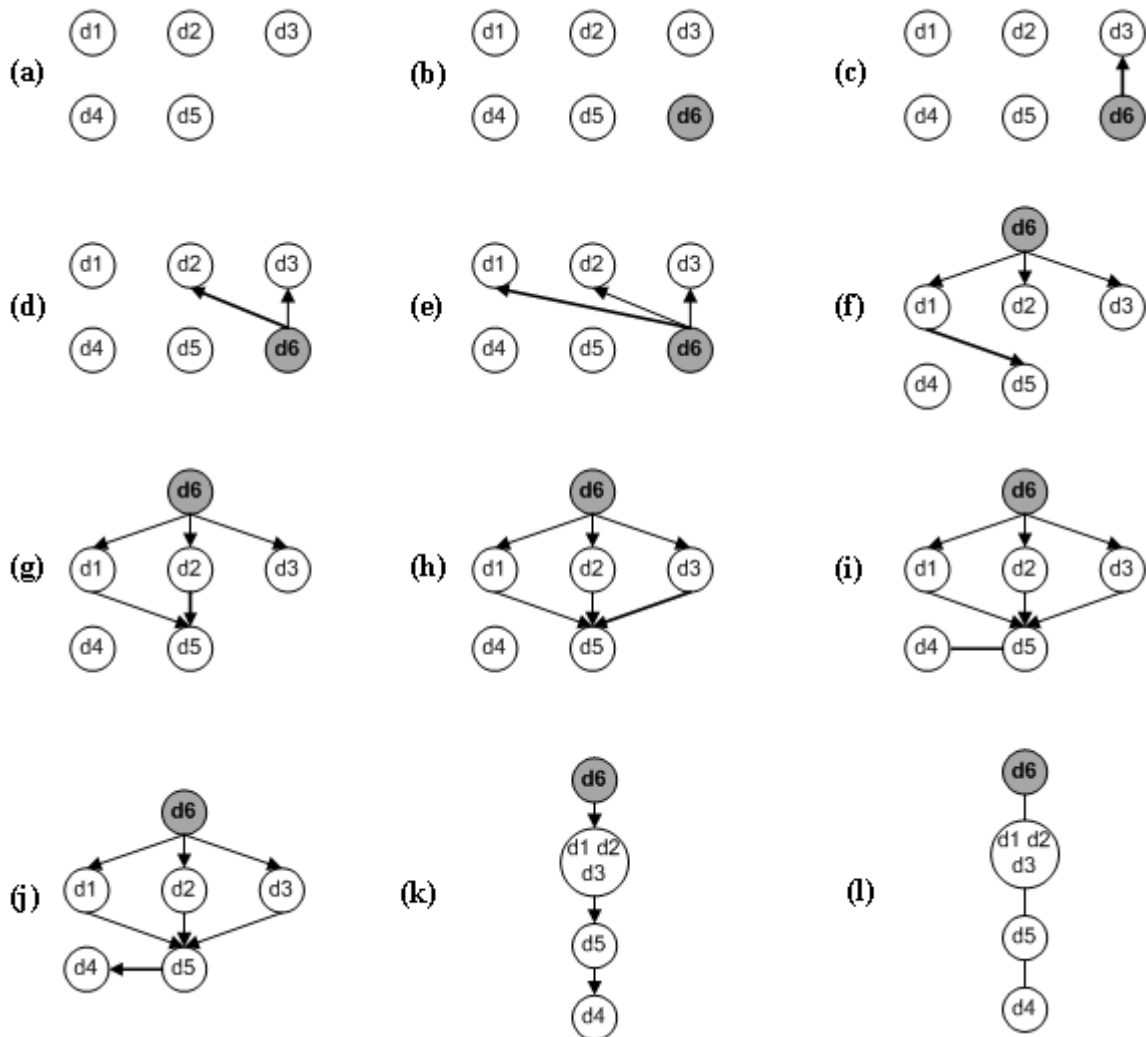


Figura 4.10: Exemplo de execução do algoritmo de análise de causa-raiz

4.4 Considerações Finais

Este capítulo apresentou o *SmartRCA*, um protótipo desenvolvido para permitir que a técnica fosse avaliada com dados de um ambiente real. Para isto, o *SmartRCA* foi modelado para ser integrado ao *Smart Alarms*, um sistema de diagnóstico de falhas utilizado na CHESF, que efetua correlação nos eventos oriundos da rede elétrica para gerar diagnósticos de falha. O *Smart Alarms* atua como o fornecedor de diagnósticos para a técnica de causa-raiz realizar sua análise.

Proveitosamente, o protótipo desenvolvido e integrado ao *Smart Alarms* permitiu a avali-

ação da técnica com diversos cenários reais extraídos tanto de dados históricos do sistema elétrico armazenados pelo *Smart Alarms*, quanto de simulações realizadas com as ferramentas. Detalhes desse processo de avaliação e os resultados obtidos são explorados no capítulo seguinte.

Capítulo 5

Avaliação da Técnica

Neste capítulo apresentamos a avaliação da solução proposta neste trabalho para realizar análise de causa-raiz em sistemas elétricos de potência. No processo de avaliação utilizamos o protótipo desenvolvido, descrito no Capítulo 4, em conjunto com o *Smart Alarms*, e dados operacionais da CHESF. Nosso objetivo é mostrar que a técnica é capaz de apresentar a causa-raiz e sua propagação para ocorrências de falha no sistema elétrico. Para isto, foram levantados cenários, formando uma base de cenários de testes para a avaliação.

O processo de obtenção dos cenários de teste passou por dois momentos: no primeiro utilizamos dados históricos armazenados pelo *Smart Alarms*, chamados de regressões, para extrair as ocorrências de falha que aconteceram nos últimos anos. Com isso, obtivemos ocorrências que, inicialmente, foram estudadas e utilizadas como ponto de partida para a elaboração da técnica de análise de causa-raiz. Em seguida, utilizamos um ambiente de simulação do sistema elétrico para criação de ocorrências sintéticas, chamado *Simulop*. Os cenários foram criados no *Simulop* por especialistas da CHESF, refletindo situações possíveis de acontecer, assim como situações semelhantes às que já aconteceram em épocas passadas, baseados nas ocorrências encontradas nos testes de regressão.

As regressões foram muito importantes no primeiro momento, pois serviram como ponto de partida para guiar os workshops iniciais, e também para o levantamento dos primeiros cenários e obtenção de regras. As regressões armazenadas pelo *Smart Alarms* também foram utilizados para a avaliação da técnica, onde avaliamos a correteza da técnica diante do comportamento do sistema elétrico em operação no mundo real. Foram avaliados também, os resultados para identificação da causa-raiz e da propagação. Para isso, utilizamos um con-

junto de 23 ocorrências, obtidas em regressões dos anos de 2008 e 2009.

Os cenários criados no Simulop foram obtidos em workshops, e abrangem subestações de diferentes tensões monitoradas pelo CROL, onde foram representadas ocorrências sobre falhas em linhas de transmissão, em barramentos e em transformadores, com variações de tipos de falhas e sintomas para cada um. No Apêndice A se encontra o conjunto de 28 cenários levantados para testes de simulação, onde para cada cenário temos os dados do *Simulop*, os diagnósticos correspondentes, e o resultado esperado da técnica de causa-raiz. Para esse conjunto de cenários, avaliamos o grau de corretude dos resultados para a identificação da causa-raiz, e para a propagação da causa-raiz. Consideramos uma propagação correta, apenas se esta estiver completa, i.e., se envolve todos os elementos que fazem parte da ocorrência.

Nas subseções seguintes apresentamos os processos de obtenção dos cenários para avaliar se a técnica apresenta os resultados corretos diante de ocorrências de falhas. Detalhamos os testes com cenários de simulação e com regressões, e seus respectivos resultados, e por fim, apresentamos a satisfação dos requisitos, descritos na Seção 3.2.

5.1 Regressões

Dados históricos reais do sistema elétrico da CHESF foram armazenados pela ferramenta *Smart Alarms* ao longo de sua utilização, formando um banco de regressões. Uma regressão consiste em simular, de forma acelerada, todos os eventos juntamente com todas as grandezas elétricas recuperadas da rede elétrica durante vários dias. Esse teste consiste em um cenário real, onde é muito grande a diversidade de informações relacionadas com os equipamentos da rede elétrica [21].

Após auxiliar a elaboração da técnica como fonte inicial de ocorrências, as regressões foram utilizadas como testes de validação da técnica, onde os dados reais armazenados são fontes de informação para que o *Smart Alarms* reproduza os diagnósticos que seriam emitidos. Para isto, faz-se necessário utilizar a topologia correspondente à época da regressão. A topologia correspondente à cada regressão também pode ser obtida nos registros históricos do *Smart Alarms*.

Para a execução das regressões, um ambiente precisa ser configurado com o *Sm-*

tAlarms, integrado previamente ao módulo *SmartRCA*. Para cada ocorrência, seguia-se a análise dos diagnósticos emitidos pelo *Smart Alarms* e a definição do resultado desejado para a técnica de análise de causa-raiz. Relatórios pós-ocorrência emitidos diariamente na CHESF pelos operadores do sistema também foram utilizados como fonte de informação para auxiliar na definição da causa-raiz. Dessa forma, os resultados obtidos pela execução da técnica proposta foram confrontados com os resultados desejados elaborados pelos especialistas. A Figura 5.1 ilustra esse processo.

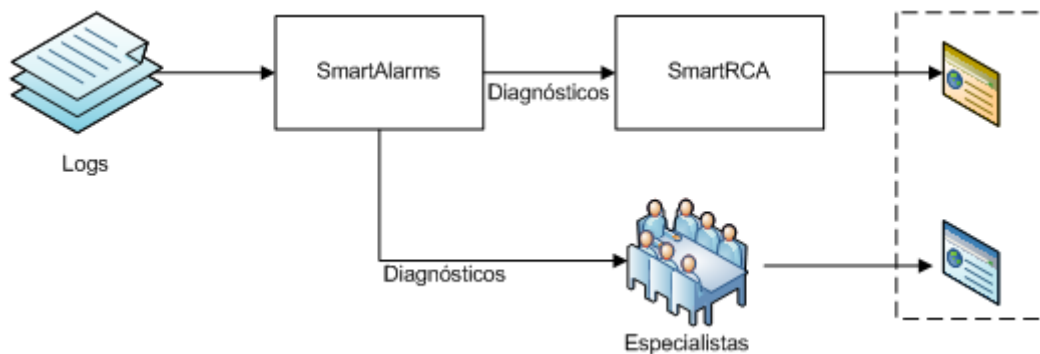


Figura 5.1: Processo dos testes de regressão

5.2 Cenários de Simulação

Utilizamos um ambiente de simulação do sistema elétrico da CHESF - *Simulop* - para a criação de ocorrências sintéticas, formando-se um conjunto de testes de simulação, que objetiva avaliar se a técnica de análise de causa-raiz apresenta resultados corretos.

O *Simulop* permite, entre outras funcionalidades, a criação de cenários sintéticos, e é capaz de simular um ambiente completo do sistema elétrico e o seu comportamento diante do cenário criado. O *Simulop* possibilita a reprodução do comportamento do sistema elétrico em tempo-real, dispondo de um subsistema composto de um modelo matemático da rede elétrica, geradores, cargas, alarmes e controles existentes. Além disso, dispõe de um conjunto de recursos que facilitam o desenvolvimento dos cenários, onde cada cenário corresponde a um ou mais grupos de eventos associados a um caso base.

Os critérios para elaboração dos cenários de teste foram:

- Os cenários devem refletir o comportamento correto do sistema elétrico;

- Toda a ocorrência deve acontecer em um intervalo máximo de 1 minuto (Parâmetro configurado no SmartRCA para realizar a correlação temporal que delimita uma possível ocorrência de falha).

Para a elaboração dos testes, um ambiente precisou ser preparado com a integração entre o Simulop e o *Smart Alarms* (previamente integrado ao protótipo *SmartRCA*), onde os dados sintéticos do Simulop são fontes de informação para que o *Smart Alarms* emita os diagnósticos correspondentes. Para cada cenário criado pelos especialistas da Chesf, foram analisados os diagnósticos emitidos pelo *Smart Alarms* e definidos os resultados esperados da técnica de análise de causa-raiz. Os resultados obtidos com a execução da técnica foram confrontados com os resultados previamente definidos (ver Figura 5.2).

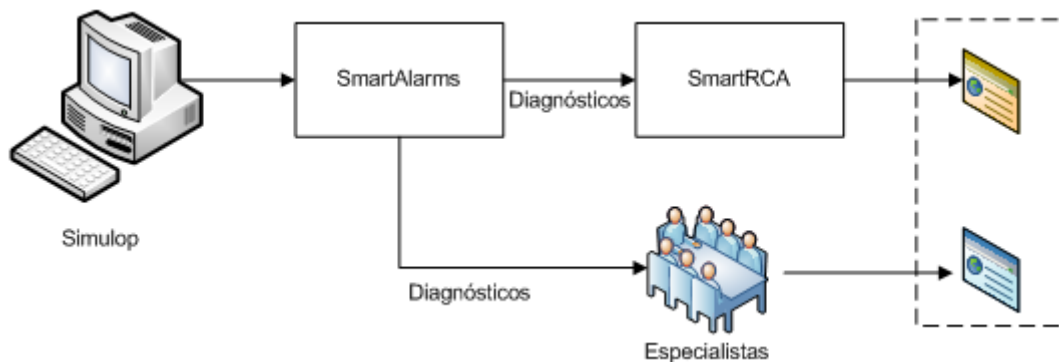


Figura 5.2: Processo dos testes de simulação

5.3 Resultados e Análise

Nos testes com as regressões, foram obtidas 23 ocorrências, em um total de aproximadamente 581 dias de regressões. Os cenários envolvem de uma a sete subestações. A margem de acerto nos testes de regressão foi de 83% para identificação da causa-raiz. Como o resultado da propagação tem relação direta com o resultado da identificação da causa-raiz, sua margem de acerto foi extraída da porcentagem de acerto da causa-raiz, sendo assim, para 83% de acerto da causa-raiz, a margem de acerto da propagação foi de 89,1%, ou seja, 74% dos 83% (Figura 5.3 (a)). Por fim, a margem de acerto nos testes de regressão para toda a técnica de causa-raiz, considerando os acertos da identificação da causa-raiz e da propagação é de 74% (Figura 5.3 (b)).

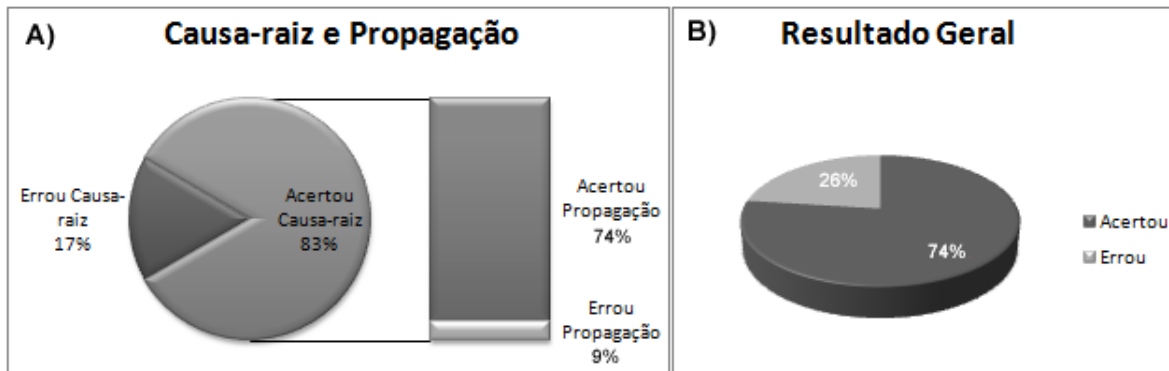


Figura 5.3: Resultado dos testes de regressão

A maior parte da margem de erro nos resultados é proveniente de comportamentos inesperados dos sistemas de proteção e à falta de dados do sistema. Por exemplo, considere a seguinte ocorrência:

```
20:56:41.674; RLD/PEN 04S9 DESARME TERMINAL PEN CRA SEM SUCESSO (SOBRECORRENTE/DISTANCIA), DEFEITO EXTERNO;
20:56:48.000; PEN 04BP DESARME COM FALHA 14T1-PEN;
;PEN 04T1 DESARME COM FALHA 14T1-PEN;
;PEN BLACKOUT;
```

Existe uma regra de identificação da causa-raiz que contemplaria essa ocorrência, porém a regra envolve a análise temporal de todos os desarmes. No entanto, o sistema não forneceu o tempo para um dos desarmes, inviabilizando a aplicação da regra. Como nenhuma regra se aplicou, a causa-raiz não pode ser identificada. Esse é um problema relativamente comum em um ambiente operacional real, onde as informações nem sempre estão completas.

Nos testes com cenários de simulação, foram avaliados 28 cenários que envolvem de uma a onze subestações de tensões variadas, e abordam problemas com linhas de transmissão, transformadores e barramentos. A margem de acerto para a identificação da causa-raiz foi de 100%, e a margem de acerto da propagação foi de 89% (Figura 5.4 (a)). Por fim, a margem de acerto nos testes de simulação para toda a técnica de causa-raiz, considerando os acertos da identificação da causa-raiz e da propagação é de 89% (Figura 5.4 (b)).

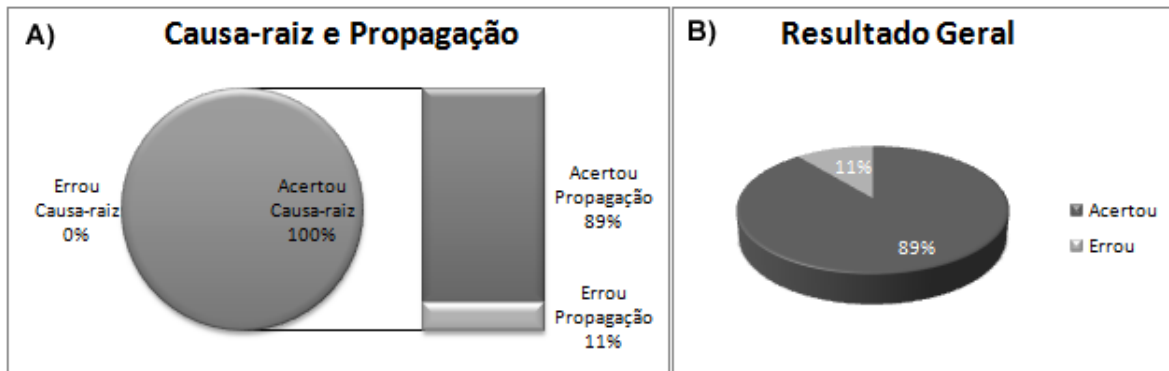


Figura 5.4: Resultado dos testes de simulação

O *SmartRCA* obteve sucesso na identificação da causa-raiz para esse conjunto de cenários, porém para alguns cenários não foi possível encontrar a propagação completa, devido à falta de regras que pudessem explicar certos relacionamentos. Por exemplo, para o Cenário 26 (ver Apêndice A), onde uma falha na linha 02J6-MRD/MRU causou o desarme dos trafos 04T1-MRD, 04T2-MRD, 04T3-MRD e 04T4-MRD, ele conseguiu identificar que a falha na linha é a causa-raiz da ocorrência, porém não soube construir seu modelo de propagação, indicando que essa falha causou os desarmes dos trafos, pois não foi definido uma regra que explique o relacionamento entre a falha de uma linha causando diretamente a falha em trafos. Outro exemplo pode ser visto no Cenário 28 (Apêndice A), onde um defeito na barra 04BP-CGD desencadeou uma série de desarmes. O *SmartRCA* identificou o defeito na barra como causa-raiz, mas a propagação foi encontrada apenas para uma parte dos elementos, devido à falta de regras de relacionamentos que pudessem explicar relacionamentos entre equipamentos muito distantes entre si no sistema elétrico. A falta de regras que contemplassem todo o cenário não inviabilizou a análise da ocorrência, sendo uma vantagem no processo.

Embora o conjunto de cenários de simulação seja em parte baseado nas ocorrências das regressões, o sucesso no resultado obtido não foi semelhante. Isso mostra que o protótipo funcionou bem na presença de ocorrências onde o comportamento do sistema está de acordo com o esperado, como as situações simuladas nos testes. Porém, na presença de comportamentos inesperados do sistema e falta de dados, presentes no conjunto de cenários de regressão, o índice de acerto foi reduzido.

Com isso, conseguimos mostrar que a técnica proposta, implementada pelo protótipo,

conseguiu atingir seu objetivo de ser capaz de identificar a causa-raiz da ocorrência e detalhar sua propagação para os demais equipamentos, sendo uma abordagem que atende aos requisitos levantados previamente. Para sua utilização em um ambiente operacional real, faz-se necessária a elaboração de um conjunto de regras mais abrangente, e também uma abordagem que possa contornar alguns problemas do sistema, como a falta de dados.

5.4 Satisfação dos Requisitos

Nesta seção apresentamos uma análise de como a técnica proposta satisfaz os requisitos levantados previamente na Seção 3.2. Os requisitos são:

- **Análise em tempo real:** a análise deve auxiliar o operador no instante imediatamente após a ocorrência de falha chegar ao sistema. Consideramos um intervalo de tempo entre um a dois segundos um tempo aceitável para que a técnica apresente seus resultados;
 - **Satisfação do requisito:** A técnica proposta permite que a análise seja feita em tempo-real, dentro de um intervalo de tempo pequeno o suficiente para que o operador possa utilizar os resultados da análise na retomada do sistema. Nos cenários levantados nos testes de regressão e nos testes de simulação, o protótipo implementado realiza a análise em um tempo médio de 0,157 segundos, sendo que o maior cenário foi executado no tempo de 0,36 segundos. Este tempo foi obtido utilizando-se um computador AMD Turion 1.80GHz com 1.2GB de memória RAM.
- **Adaptável a mudanças de topologia:** Uma rede elétrica é um sistema mutável, em constante evolução, e está sujeita a alterações em sua topologia. Dessa forma, a técnica deve se ajustar às mudanças da forma mais automática possível e trabalhar em conformidade com o sistema elétrico, sem comprometer a qualidade da análise;
 - **Satisfação do requisito:** A técnica proposta trabalha com uma instância da topologia vigente no momento antes da ocorrência. Trabalha com regras genéricas que não fazem referência a equipamentos específicos, dessa forma, alterações

na topologia não causam mudanças na base de regras genéricas. Os cenários dos testes de regressão são cenários reais do período de dois anos (2008 e 2009). Certamente, alterações na topologia foram feitas nesse intervalo de tempo, e os resultados da técnica não foram afetados por tais mudanças.

- **Escalabilidade:** Situações de falha podem atingir grandes proporções do sistema elétrico, envolvendo dezenas/centenas de componentes. Para garantir sua eficiência, a técnica deve ter complexidade aceitável para grandes ocorrências, apresentando resultados em tempo hábil para o operador realizar seu trabalho;

- **Satisfação do requisito:** Nossa medida adotada para caracterizar uma grande ocorrência é o número de subestações envolvidas na ocorrência, pois, quanto maior o número de subestações envolvidas, maior a dimensão da ocorrência e maior o número de equipamentos afetados. O maior cenário de falha levantado nos testes de simulação envolve até onze subestações, das quais seis tiveram *blackout*, e este foi executado pelo protótipo no tempo de 0,36 segundos. Segundo os especialistas da CHESF, este teste simula uma das maiores ocorrências que aconteceu no sistema leste da CHESF desde o ano de 2005. O SmartRCA conseguiu identificar a causa-raiz da ocorrência, e a maior parte da propagação da falha, porém não conseguimos levantar regras que pudessem cobrir toda a propagação da falha, pela dificuldade de explicar o relacionamento entre equipamentos muito distantes entre si no sistema. Para este cenário, os especialistas não conseguiram elaborar uma regra que pudesse explicar o relacionamento. Porém, os especialistas ficaram satisfeitos com o resultado apresentado pelo SmartRCA para a ocorrência.

- **Identificar múltiplas causas-raiz:** Em algumas ocorrências, existe a possibilidade de que a explicação mais coerente da falha envolva em sua origem mais de um componente. Dessa forma, a técnica deve considerar essa possibilidade;

- **Satisfação do requisito:** A técnica permite que mais de uma causa-raiz seja identificada na ocorrência, pois cada regra tentará identificar um elemento como causa-raiz. Idealmente, no resultado final os elementos que são causa-raiz de uma

mesma ocorrência serão agrupados no elemento raiz de uma árvore, ou replicadas em mais de uma árvore. O cenário 05 (ver Apêndice B) é um exemplo onde duas causas explicam a ocorrência. No entanto, faz-se necessário um número representativo de cenários, em termos de situações que definem múltiplas causas-raiz, para indicar que a técnica, de fato, satisfaz esse requisito.

- **Lidar com dessincronização de tempo:** Os eventos que chegam da rede elétrica nem sempre estão com os dados temporais corretos, e o tempo de uma subestação pode não estar sincronizado com o de outra subestação. Dessa forma, a técnica deve ser capaz de lidar com os dados temporais dessincronizados;
 - **Satisfação do requisito:** A técnica trabalha com regras que envolvem conhecimentos sobre diferentes domínios, além da temporalidade dos eventos, como por exemplo, os sistemas de proteção atuados e a conectividade dos elementos de rede com falha. Sendo assim, existem regras que independem da informação temporal dos eventos, não sendo afetadas caso os dados temporais estejam incorretos.
- **Causa-raiz implícita:** Em algumas ocorrências, é possível que a causa-raiz não esteja presente nos diagnósticos que representam a ocorrência. Dessa forma, a técnica deve ser capaz de identificar a causa-raiz, mesmo que seja implícita.
 - **Satisfação do requisito:** Conforme ilustrado no exemplo do Capítulo 4, a técnica permite a identificação de causa-raiz implícita. Isso é possível pois podem ser definidas regras, que analisam a ocorrência, e descobrem a causa-raiz a partir dos diagnósticos fornecidos.

5.5 Considerações Finais

Neste capítulo apresentamos os processos de avaliação da técnica de análise de causa-raiz proposta. Mostramos como a técnica satisfaz os requisitos pré-definidos na Seção 3.2 utilizando como base o protótipo desenvolvido em conjunto com o *Smart Alarms*. Detalhamos também, o processo de aplicação dos testes com cenários de simulação e com regressões,

com o intuito de avaliar se a técnica apresenta resultados corretos para ocorrências de falha no sistema elétrico.

Com os resultados dos testes, podemos concluir que a técnica foi capaz de identificar corretamente a causa-raiz e detalhar sua propagação para a maioria dos cenários de falha, se mostrando uma abordagem viável para esse propósito.

Um dos maiores problemas enfrentados na etapa de avaliação foi a dificuldade de levantar cenários válidos. Um dos motivos foi que inicialmente nos baseamos apenas na busca de ocorrências nos dados históricos, que em sua maioria, continham ocorrências recorrentes do sistema, muitos ruídos, e dados inconsistentes. Posteriormente, a escassez de tempo dos especialistas para o levantamento de cenários sintéticos também limitou o processo, assim como a limitação de tempo do nosso trabalho.

Outro problema enfrentado durante o desenvolvimento do nosso trabalho, foi que o *Smart Alarms* estava passando por processos de atualização e correções, onde modificações eram feitas nos diagnósticos que representavam a ocorrência. Isso dificultou o levantamento de cenários e de regras, e conseqüentemente, a etapa de avaliação.

Segundo os especialistas da CHESF, o conjunto de cenários de teste utilizado é bastante representativo e cobre os principais tipos de falha que ocorrem no sistema. No entanto, para uma melhor avaliação do conjunto de regras levantado, faz-se necessário o levantamento de um número maior de cenários. Em virtude do tempo limitado do nosso trabalho, sugerimos essa avaliação como trabalhos futuros.

Capítulo 6

Trabalhos Relacionados

Este capítulo apresenta trabalhos semelhantes, que têm como propósito a análise de causa-raiz em sistemas elétricos de potência, ou em processos industriais, sendo ressaltadas as principais deficiências das técnicas adotadas.

Em seu trabalho, Larsson et. al [17], apresentam uma tecnologia baseada em Modelos de Fluxo Multiníveis (MFM) para realizar análise de causa-raiz em alarmes de sistemas de potência. Modelo de Fluxo Multinível (MFM) é uma metodologia de modelagem que descreve a estrutura hierárquica de processos industriais complexos. MFM é composto por três entidades: objetivos, funções e componentes. Os objetivos descrevem o propósito de uso do sistema - a meta que o sistema ou subsistema deve alcançar. As funções são o meio pelo qual um componente físico irá alcançar a meta. As funções são representadas por um conjunto de massa, energia, ou fluxo de informação, estruturadas em diversos níveis de abstração. E finalmente, componentes são os dispositivos físicos, usados para realizar uma ou mais funções.

O algoritmo utilizado foi apresentado previamente por Larsson [14] para análise de causa-raiz baseada em MFM, em um cenário onde a maioria dos eventos são falhas conseqüentes, causadas por falhas primárias. O algoritmo usa MFM para calcular quando um alarme é primário ou é um alarme secundário (conseqüente), utilizando uma tabela de regras de causas para cada conexão sintaticamente válida entre os objetos do modelo, e sempre que o estado de falha do objeto muda, o algoritmo calcula se é uma falha raiz, ou causada por uma falha vizinha, procurando por estados de falhas dos objetos vizinhos, e aplicando as regras da respectiva tabela de causas. Assim, cada alarme é nomeado como causa-raiz ou

conseqüente.

No entanto, é importante observar que nessa abordagem não é possível ter certeza que um alarme é de fato secundário, pois o método diferencia entre alarmes que certamente são primários, e alarmes que podem ser primários ou secundários. Outra limitação é que para realizar a análise, faz-se necessário modelar o comportamento do fluxo da energia no sistema como uma informação estática, porém, em sistemas que tem topologia em anel, pode ser difícil identificar qual a direção do fluxo no momento da ocorrência, e o modelo utilizado pode estar incorreto; A técnica também não é capaz de lidar com ocorrências onde a causa-raiz é um equipamento que não tem um sistema de proteção associada a ele, e o alarme correspondente não é gerado, dessa forma, a técnica não terá como descobrir que tal equipamento é causa-raiz, pois depende da existência do alarme para classificá-lo como causa-raiz ou conseqüente.

Weidl et. al [24] apresentam uma metodologia para análise de causa-raiz e suporte à decisão em operações de processos industriais, onde o processo industrial é modelado usando redes bayesianas orientadas a objeto. Redes bayesianas, ou redes de Bayes, são modelos gráficos probabilísticos para raciocínio com incertezas. Uma rede bayesiana $N = (G, P)$ é representada por um grafo direto e acíclico $G = (V, L)$, onde V é um conjunto de nós, ou vértices, representando variáveis randômicas, L é um conjunto de links conectando estes nós, representando relações de dependência entre os nós; e P representa um conjunto de probabilidades condicionais associadas aos nós.

Em seu trabalho, o modelo da rede bayesiana reflete as relações de dependência entre três camadas simbólicas (conceituais) de variáveis randômicas no domínio do problema. A primeira camada contém todas as possíveis hipóteses de origem de falhas, a segunda camada modela todos os sintomas (eventos) e a terceira camada contém todas as falhas do sistema. As origens de falhas (causas) podem habilitar diferentes eventos, os quais precedem uma falha.

Embora sejam capazes de lidar com dados inconsistentes e com ruídos, redes bayesianas são complexas de serem modeladas para grandes sistemas, e, especificamente para sistemas elétricos, sua modelagem se torna inviável no sentido de que o número de possíveis configurações de *falha* \rightarrow *efeito* \rightarrow *causa* para modelar uma rede elétrica completa pode levar a um problema NP-completo. Além disso, existe a dificuldade de estimar valores proba-

bilísticos para o modelo, e dificuldade em atualizar o modelo na presença de mudanças na topologia.

Aizpurúa et.al [1] apresentam uma metodologia que integra técnicas de diferentes domínios para tratar cascata de alarmes de sistemas elétricos de potência, com o objetivo de encontrar uma árvore de alarmes para que o operador possa identificar a causa-raiz da ocorrência de falha. O método proposto integra domínios como inteligência artificial, grafos e ontologias, divididos em um processo de quatro fases, onde cada fase tem uma contribuição para alcançar o objetivo final, que é a identificação da causa-raiz. Conforme relatado no trabalho, este encontra-se em desenvolvimento, e dessa forma, não foram apresentados resultados que apontem seu sucesso na identificação da causa-raiz da ocorrência.

Entre outras técnicas, o método proposto utiliza um sistema especialista baseado em regras, porém as regras implementadas fazem referência a equipamentos específicos do sistema, o que dificulta consideravelmente o seu uso mediante mudanças na topologia do sistema. O método utiliza também redes neurais artificiais para representar relações de causa entre os elementos. Redes neurais artificiais são redes computacionais que tentam simular, de forma rudimentar, as redes de células nervosas do sistema nervoso central biológico. Possuem arquitetura de computação paralela, obtendo assim, um rápido processamento, e devido à sua capacidade de generalização, podem reconhecer padrões mesmo na presença de inconsistência e ruídos nos dados de entrada. No entanto, requerem uma base de dados históricos extensa e representativa para a etapa de treinamento, que é uma etapa fundamental para determinar a acurácia de seus resultados. Outra desvantagem de sistemas com redes neurais é que eles requerem períodos longos de treinamento, e seu comportamento fora da área de treinamento é difícil de prever.

Todos esses trabalhos apresentam limitações e também não satisfazem o requisito de adaptabilidade à mudanças na topologia. Em contrapartida, com a utilização de regras genéricas, a técnica proposta em nosso trabalho consegue satisfazer esse requisito, possibilitando que equipamentos sejam incluídos, ou removidos do sistema, sem que a técnica sofra alterações. Além disso, diferentemente das técnicas apresentadas, nossa técnica permite a visualização do resultado em um modelo de causa-efeito entre os diagnósticos da ocorrência, explicando como toda a ocorrência aconteceu após a causa-raiz. Dessa forma, mesmo apresentando algumas limitações inerentes dos sistemas baseados em regras, nossa

técnica se mostra uma melhor abordagem para a análise de causa-raiz em sistemas elétricos.

Capítulo 7

Conclusões

Neste capítulo apresentamos as considerações finais sobre o trabalho desenvolvido e sugestões para trabalhos futuros.

O objetivo do trabalho foi apresentar uma técnica de análise de causa-raiz para interpretação de ocorrências de falhas em sistemas elétricos de potência. A análise de causa-raiz é uma forma de auxiliar o operador na compreensão da ocorrência e conseqüentemente em seu trabalho de recuperação do sistema. Dessa forma, contribui para aumentar a disponibilidade desses sistemas, contribuindo em conseqüência, para uma maior qualidade do fornecimento da energia elétrica.

A técnica proposta utiliza o raciocínio baseado em regras. Consiste na aplicação de regras parametrizadas para construir um modelo de propagação de falha com os diagnósticos da ocorrência, onde cada diagnóstico está associado a um equipamento com falha. A técnica apresenta a causa-raiz da ocorrência e sua propagação para as falhas conseqüentes em um modelo de causa-efeito, facilitando a compreensão de como toda a ocorrência aconteceu a partir da falha primária. O modelo é uma árvore, onde o nó raiz identifica a causa-raiz da ocorrência e os níveis da árvore explicam os relacionamentos de causa-efeito entre os diagnósticos, sendo um modelo de fácil entendimento e auto-explicativo.

A utilização de regras parametrizadas traz grandes vantagens ao processo, permitindo que a técnica seja adaptável a alterações na topologia do sistema, e contribuindo para sua escalabilidade. Além disso, a técnica permite a identificação de múltiplas causas-raiz para uma ocorrência e também é capaz de lidar com ruídos nos diagnósticos de entrada, pois não existirá relacionamento entre um ruído e os demais elementos da ocorrência.

A técnica foi projetada para trabalhar em conjunto com um sistema de diagnóstico de falhas, responsável pelo prévio correlacionamento nos eventos da rede elétrica para gerar os diagnósticos de falha que irão representar uma ocorrência. Esse processo contribuiu para a simplificação e abordagem direta do problema, pois eventuais problemas com os dados da rede elétrica podem ser corrigidos pelo FDS e o número de diagnósticos que representam uma ocorrência é incomparavelmente menor que o número de eventos sinalizados pelos equipamentos envolvidos na ocorrência.

Para avaliar a técnica, elaboramos um estudo de caso no contexto da CHESF: desenvolvemos um protótipo que implementa a técnica proposta; levantamos um conjunto de regras parametrizadas com especialistas da CHESF; e levantamos um conjunto de cenários de falhas, também com os especialistas da CHESF. O protótipo foi integrado ao *Smart Alarms*, um FDS utilizado na CHESF que efetua correlação nos eventos oriundos da rede elétrica para gerar diagnósticos de falha. Utilizamos também uma ferramenta de simulação do sistema elétrico, o *Simulop*. Isso permitiu simular um ambiente operacional real, e o *Smart Alarms* atuou como o fornecedor de diagnósticos para a técnica de causa-raiz realizar sua análise. A causa-raiz foi identificada corretamente em 100% dos cenários, e a propagação completa foi identificada para 89% dos cenários. A margem de erro na propagação é composta de cenários cuja propagação foi identificada apenas parcialmente, devido à falta de regras que contemplassem os cenários. Com isso conseguimos mostrar que a técnica é capaz de realizar uma análise completa, atendendo aos requisitos definidos para a solução, e sendo uma abordagem viável no domínio de sistemas elétricos.

Utilizamos também na avaliação, um conjunto de regressões, que são dados históricos armazenados pelo *Smart Alarms*. Isso permitiu a avaliação com cenários do mundo real, onde existem problemas como a falta de dados, e comportamentos inesperados do sistema. A margem de acerto foi de 74%, indicando que, para ser aplicada em um ambiente operacional real, faz-se necessário a elaboração de um conjunto de regras abrangente e que possa contornar esses problemas.

Para uma melhor avaliação faz-se necessário o levantamento de um número maior de cenários, e conseqüentemente, a elaboração de um conjunto de regras que possa cobrir todo o conjunto de cenários. Em virtude do tempo limitado do nosso trabalho, sugerimos essa avaliação como trabalhos futuros. A técnica também apresenta algumas limitações como in-

abilidade de lidar com problemas que não foram definidos previamente, e também de aprender a partir de experiência, esses também são campos que podem ser explorados para uma possível evolução da técnica.

A técnica proposta conseguiu realizar com sucesso todo o processo de análise de causa-raiz para diversos cenários de falha, identificando o equipamento que iniciou a ocorrência e detalhando sua propagação para todos os outros equipamentos envolvidos. Isso mostra que nosso trabalho obteve sucesso no sentido de encontrar uma técnica para análise de causa-raiz em sistemas elétricos. Embora seja uma proposta genérica, a técnica foi testada apenas com um sistema de diagnóstico de falhas. Uma sugestão de trabalho futuro é a sua integração a outros sistemas de diagnósticos de falha, para avaliar sua generalidade.

Atualmente, o protótipo desenvolvido está sendo implantado em fase de teste no centro regional de operação de sistema leste da CHESF. Devido ao tempo limitado não será possível avaliar o seu comportamento nesse trabalho. Dessa forma, outra sugestão de trabalho futuro é a avaliação de satisfação por parte dos operadores e avaliação do impacto na tarefa de restauração do sistema. Essa avaliação complementaria o objetivo final de auxiliar o operador na compreensão da ocorrência e conseqüentemente em seu trabalho de recuperação do sistema.

Bibliografia

- [1] AIZPURUA, O., GALAN, R., AND JIMENEZ, A. A new cognitive-based massive alarm management system in electrical power administration. In *Devices, Circuits and Systems, 2008. ICCDCS 2008. 7th International Caribbean Conference on* (April 2008), pp. 1–6.
- [2] BECRAFT, W. Diagnostic applications of artificial neural networks. In *Neural Networks, 1993. IJCNN '93-Nagoya. Proceedings of 1993 International Joint Conference on* (Oct. 1993), vol. 3, pp. 2807–2810 vol.3.
- [3] BELLUR, U., AND AGRAWAL, A. Root cause isolation for self healing in j2ee environments. In *SASO '07: Proceedings of the First International Conference on Self-Adaptive and Self-Organizing Systems* (Washington, DC, USA, 2007), IEEE Computer Society, pp. 324–327.
- [4] BREITGAND, D., HENIS, E., LADAN-MOZES, E., SHEHORY, O., AND YERUSHALMI, E. Root-cause analysis of san performance problems: an i/o path affine search approach, 2005.
- [5] CARVALHO, J. P. B. Mapas cognitivos baseados em regras difusas: Modelação e simulação da dinâmica de sistemas qualitativos. Tese de Doutoramento. Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, 2001.
- [6] CHAN, E. Application of neural-network computing in intelligent alarm processing [power systems]. In *Power Industry Computer Application Conference, 1989. PICA '89, Conference Papers* (May 1989), pp. 246–251.

-
- [7] CHEN, M., ZHENG, A., LLOYD, J., JORDAN, M., AND BREWER, E. Failure diagnosis using decision trees. In *Autonomic Computing, 2004. Proceedings. International Conference on* (May 2004), pp. 36–43.
- [8] CIGRÉ. New trends for automated fault and disturbance analysis. CIGRÉ, Technical Brochure, Working Group B5-20, 2007.
- [9] COURY, D. V. Introdução aos sistemas elétricos de potência. Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Engenharia Elétrica São Carlos, Universidade de São Paulo.
- [10] DUARTE, A. N. Tratamento de eventos em redes elétricas: Uma ferramenta. Dissertação de Mestrado, Departamento de Sistemas e Computação, Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, Brazil, 2003.
- [11] HASAN, M., SUGLA, B., AND VISWANATHAN, R. A conceptual framework for network management event correlation and filtering systems. In *Integrated Network Management VI* (1999), IEEE Press, pp. 233–246.
- [12] JULISCH, K. Clustering intrusion detection alarms to support root cause analysis. *ACM Trans. Inf. Syst. Secur.* 6, 4 (2003), 443–471.
- [13] KOENE, J., AND VEDAM, H. Alarm management and rationalization. In *Third International Conference on Loss Prevention* (2000).
- [14] LARSSON, J. E. Knowledge-based methods for control systems. *Doctor's thesis, TFRT-1040, Department of Automatic Control, Lund Institute of Technology, Lund.* (1992).
- [15] LARSSON, J. E. On-line root cause analysis for nuclear power plant control rooms. In *International Symposium on Symbiotic Nuclear Power Systems for the 21st Century, ISSNIP* (2007).
- [16] LARSSON, J. E., AND DEBOR, J. Real-time root cause analysis for complex technical systems. In *Human Factors and Power Plants and HPRCT 13th Annual Meeting, 2007 IEEE 8th* (Aug. 2007), pp. 156–163.

- [17] LARSSON, J. E., ÖHMAN, B., AND CALZADA, A. Real-time root cause analysis for power grids. *Security and Reliability of Electric Power Systems, CIGRÉ Regional Meeting* (2007).
- [18] LARSSON, J. E., ÖHMAN, B., CALZADA, A., NIHLWING, C., JOKSTAD, H., KRISTIANSEN, L. I., KVALEM, J., AND LIND, M. A revival of the alarm system: Making the alarm list useful during incidents. In *Proceedings of the 5th International Topical Meeting on Nuclear Plant Instrumentation, Controls, and Human Interface Technology* (2006).
- [19] LEE, C. Faults discovery using mined data. In *Proceedings of The 2005 International Conference on Machine Learning, Models, Technologies and Applications, MLMTA* (2005).
- [20] MEIRA, D. A model for alarm correlation in telecommunications networks. Ph.D Thesis. Computer Science. Institute of Exact Sciences (ICEX) of the UFMG. Belo Horizonte, Brazil, 1997.
- [21] NETO, E. R. Uma ferramenta robusta de tratamento de eventos em redes elétricas. Dissertação de Mestrado, Departamento de Sistemas e Computação, Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, Brazil, 2004.
- [22] OUYANG, J., YANG, M., YOSHIKAWA, H., AND ZHOU, Y. Modeling of pwr plant by multilevel flow model and its application in fault diagnosis. *Journal of Nuclear Science and Technology* 42, 8 (2005), 695–705.
- [23] WANG, J. Encyclopedia of data warehousing and mining. Idea Group Reference, Montclair State University, USA, 2006.
- [24] WEIDL, G., MADSEN, A. L., AND ISRAELSSON, E. Object-oriented bayesian networks for condition monitoring, root cause analysis and decision support on operation of complex continuous processes: Methodology and applications. Technical Report, 36 p. IST - University of Stuttgart., 2005.
- [25] WIETGREFE, H., DIETER TUCHS, K., JOBMAN, K., CARLS, G., FRÖHLICH, P., NEJDL, W., AND STEINFELD, S. Using neural networks for alarm correlation in

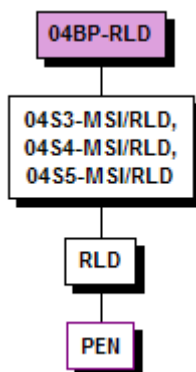
cellular phone networks. In *In Proc. International Workshop on Applications of Neural Networks in Telecommunications* (1997).

Apêndice A

Cenários de Teste

Este apêndice apresenta um conjunto de cenários de simulação utilizados para avaliação da técnica de causa-raiz apresentada. Para cada cenário, seguem-se os dados informados ao *Simulop* para a geração do cenário, os diagnósticos emitidos pelo *SmartAlarms* e o resultado obtido com a técnica de causa-raiz.

Cenário 1
Dados do Simulop
E:R:000001:BKT :MSI :14S3-MSI :ATUACAO 04S3-MSI-PPZS
E:R:000001:BKT :MSI :14S4-MSI :ATUACAO 04S4-MSI-PPZS
E:R:000001:BKT :MSI :14S5-MSI :ATUACAO 04S5-MSI-PPZS
Diagnósticos do Smart
11/11/09 19:12:33; RLD BLACKOUT; BLACKOUT; MAX
11/11/09 19:11:49; MSI/RLD 04S3 DESARME TERMINAL MSI (DISTANCIA), DEFEITO EXTERNO; DESARME_LADO_DE; HIGH
11/11/09 19:11:49; MSI/RLD 04S5 DESARME TERMINAL MSI (DISTANCIA), DEFEITO EXTERNO; DESARME_LADO_DE; HIGH
11/11/09 19:12:33; PEN BLACKOUT; BLACKOUT; MAX
11/11/09 19:11:49; MSI/RLD 04S4 DESARME TERMINAL MSI (DISTANCIA), DEFEITO EXTERNO; DESARME_LADO_DE; HIGH
Causa-raiz



Cenário 2

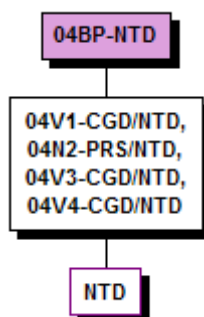
Dados do Simulop

E:R:000001:BKT :PRS :14N2-PRS :ATUACAO 04N2-PRS-PPZS
 E:R:000001:BKT :CGD :14V4-CGD :ATUACAO 04V4-CGD-PPZS
 E:R:000001:BKT :CGD :14V1-CGD :ATUACAO 04V1-CGD-PPZS
 E:R:000001:BKT :NTD :14V3-NTD :ATUACAO 04V3-CGD-PPZQ

Diagnósticos do Smart

11/11/09 09:51:14; CGD/NTD 04V3 DESARME TERMINAL NTD (DISTANCIA DIRECAOREVERSA), DEFEITO EXTERNO; DESARME_LADO_PARA; HIGH
 11/11/09 09:51:14; CGD/NTD 04V4 DESARME TERMINAL CGD (DISTANCIA), DEFEITO EXTERNO; DESARME_LADO_DE; HIGH
 11/11/09 09:51:14; PRS/NTD 04N2 DESARME TERMINAL PRS (DISTANCIA), DEFEITO EXTERNO; DESARME_LADO_DE; HIGH
 11/11/09 09:51:22; NTD BLACKOUT; BLACKOUT; MAX
 11/11/09 09:51:14; CGD/NTD 04V1 DESARME TERMINAL CGD (DISTANCIA), DEFEITO EXTERNO; DESARME_LADO_DE; HIGH

Causa-raiz

**Cenário 3**

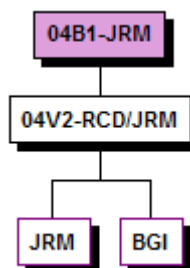
Dados do Simulop

E:R:000001:BKT :JRM :14V5-JRM :ATUACAO 04B1-JRM-PDIF
 E:R:000005:BKT :RCD :14V2-RCD :ATUACAO 04V2-RCD-PPTS
 E:R:000005:BKT :JRM :14V2-JRM :ATUACAO 04V2-JRM-PPTS
 E:R:000001:BKT :JRM :14D1-JRM
 E:R:000001:BKT :JRM :14T1-JRM
 E:R:000001:BKT :JRM :14V1-JRM
 E:R:000001:BKT :JRM :14V3-JRM

Diagnósticos do Smart

11/11/09 19:17:38; RCD/JRM 04V2 DESARME (DISTANCIA); DESARME; HIGH (interno)
 11/11/09 19:17:49; BGI BLACKOUT; BLACKOUT; MAX
 11/11/09 19:17:37; JRM 04B1 DESARME COM BLOQUEIO; DESARME; HIGH
 11/11/09 19:17:49; JRM BLACKOUT; BLACKOUT; MAX

Causa-raiz



Cenário 4

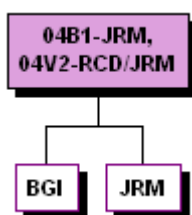
Dados do Simulop

E:R:000001:BKT :JRM :14V5-JRM :ATUACAO 04B1-JRM-PDIF
E:R:000001:BKT :RCD :14V2-RCD :ATUACAO 04V2-RCD-PPTS
E:R:000001:BKT :JRM :14V2-JRM :ATUACAO 04V2-JRM-PPTS
E:R:000001:BKT :JRM :14D1-JRM
E:R:000001:BKT :JRM :14T1-JRM
E:R:000001:BKT :JRM :14V1-JRM
E:R:000001:BKT :JRM :14V3-JRM

Diagnósticos do Smart

11/11/09 19:17:37; RCD/JRM 04V2 DESARME (DISTANCIA); DESARME; HIGH (interno)
11/11/09 19:17:49; BGI BLACKOUT; BLACKOUT; MAX
11/11/09 19:17:37; JRM 04B1 DESARME COM BLOQUEIO; DESARME; HIGH
11/11/09 19:17:49; JRM BLACKOUT; BLACKOUT; MAX

Causa-raiz

**Cenário 5**

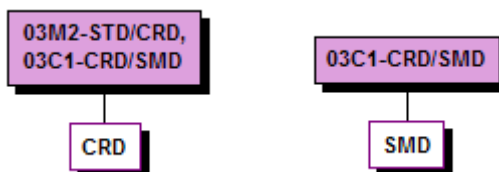
Dados do Simulop

E:R:000001:BKT :STD :13M2-STD :ATUACAO 03M2-STD-PPDZ
E:R:000001:BKT :CRD :13M2-CRD :ATUACAO 03M2-CRD-DFPP
E:R:000001:BKT :SMD :13C2-SMD :ATUACAO 03C1-SMD-DFPP
E:R:000001:BKT :CRD :13C1-CRD :ATUACAO 03C1-CRD-DFPP

Diagnósticos do Smart

11/11/09 19:19:57; SMD BLACKOUT; BLACKOUT; MAX
11/11/09 19:19:48; STD/CRD 03M2 DESARME (SOBRECORRENTE); DESARME; HIGH (interno)
11/11/09 19:19:48; CRD/SMD 03C1 DESARME (SOBRECORRENTE); DESARME; HIGH (interno)
11/11/09 19:19:57; CRD BLACKOUT; BLACKOUT; MAX

Causa-raiz



Cenário 6**Dados do Simulop**

E:R:000002:BKD :MRD :12J6-MRD :ATUACAO 12J6-MRD-FLDI
 E:R:000001:BKT :MRD :12T1-MRD :ATUACAO 02A1-MRD-SCON
 E:R:000001:BKT :MRD :12T2-MRD
 E:R:000001:BKT :MRD :12T3-MRD
 E:R:000001:BKT :MRD :12T4-MRD
 E:R:000001:BKT :MRD :12J1-MRD
 E:R:000001:BKT :MRD :12J2-MRD
 E:R:000001:BKT :MRD :12J3-MRD
 E:R:000001:BKT :MRD :12J7-MRD
 E:R:000001:BKT :MRD :12J8-MRD
 E:R:000001:BKT :MRD :12H1-MRD
 E:R:000001:BKT :MRD :12H2-MRD
 E:R:000005:BKE :MRD :12J6-MRD :ATUACAO 02J6-MRD-SCON

Diagnósticos do Smart

11/11/09 19:21:47; MRD/MRU 02J6 DESARME COM FALHA 12J6-MRD (SOBRECORRENTE); DESARME; HIGH (interno)
 11/11/09 19:21:38; MRD 02BP DESARME COM FALHA 12J6-MRD, PROTECAO 02A1-MRD SOBRECORRENTE; DESARME;
 HIGH

Causa-raiz**Cenário 7****Dados do Simulop**

E:R:000001:BKD :MRD :12J6-MRD :ATUACAO 12J6-MRD-FLDI
 E:R:000005:BKT :MRD :12T1-MRD :ATUACAO 02A1-MRD-SCON
 E:R:000005:BKT :MRD :12T2-MRD
 E:R:000005:BKT :MRD :12T3-MRD
 E:R:000005:BKT :MRD :12T4-MRD
 E:R:000005:BKT :MRD :12J1-MRD
 E:R:000005:BKT :MRD :12J2-MRD
 E:R:000005:BKT :MRD :12J3-MRD
 E:R:000005:BKT :MRD :12J7-MRD
 E:R:000005:BKT :MRD :12J8-MRD
 E:R:000005:BKT :MRD :12H1-MRD
 E:R:000005:BKT :MRD :12H2-MRD
 E:R:000001:BKE :MRD :12J6-MRD :ATUACAO 02J6-MRD-SCON

Diagnósticos do Smart

11/11/09 19:21:38; MRD/MRU 02J6 DESARME COM FALHA 12J6-MRD (SOBRECORRENTE); DESARME; HIGH (interno)
 11/11/09 19:21:40; MRD 02BP DESARME COM FALHA 12J6-MRD, PROTECAO 02A1-MRD SOBRECORRENTE; DESARME;
 HIGH

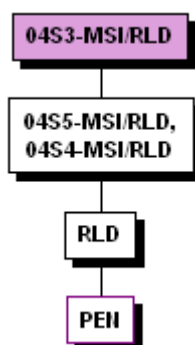
Causa-raiz

Cenário 8**Dados do Simulop**

E:R:000001:BKT :MSI :14S3-MSI :ATUACAO 04S3-MSI-SCON
E:R:000005:BKT :MSI :14S4-MSI :ATUACAO 04S4-MSI-PPZS
E:R:000005:BKT :MSI :14S5-MSI :ATUACAO 04S5-MSI-PPZS
E:R:000001:BKD :RLD :RLD:14S3:52 :ATUACAO 04S3-RLD-SCON

Diagnósticos do Smart

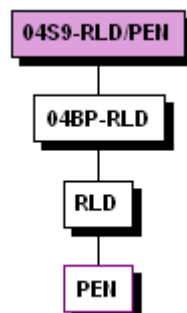
11/11/09 19:23:55; RLD BLACKOUT; BLACKOUT; MAX
11/11/09 19:23:44; MSI/RLD 04S3 DESARME COM FALHA (SOBRECORRENTE); DESARME; HIGH
11/11/09 19:23:46; MSI/RLD 04S5 DESARME TERMINAL MSI (DISTANCIA), DEFEITO EXTERNO; DESARME_LADO_DE; HIGH
11/11/09 19:23:55; PEN BLACKOUT; BLACKOUT; MAX
11/11/09 19:23:46; MSI/RLD 04S4 DESARME TERMINAL MSI (DISTANCIA), DEFEITO EXTERNO; DESARME_LADO_DE; HIGH

Causa-raiz**Cenário 9****Dados do Simulop**

E:R:000001:BKD :RLD :RLD:14S9:52 :ATUACAO 14S9-RLD-FLDI
E:R:000001:BKT :PEN :PEN:14S9:52 :ATUACAO 04S9-PEN-ATPR
E:R:000002:BKT :RLD :RLD:14S3:52
E:R:000002:BKT :RLD :RLD:14S4:52
E:R:000002:BKT :RLD :RLD:14S5:52
E:R:000002:BKT :RLD :RLD:14S2:52
E:R:000002:BKT :RLD :RLD:14T1:52
E:R:000002:BKT :RLD :RLD:14T3:52
E:R:000001:BKD :RLD :RLD:14S9:52 :ATUACAO 04S9-RLD-PPZS

Diagnósticos do Smart

11/11/09 19:25:40; RLD BLACKOUT; BLACKOUT; MAX
11/11/09 19:25:40; PEN BLACKOUT; BLACKOUT; MAX
11/11/09 19:25:31; RLD 04BP DESARME COM FALHA 14S9-RLD; DESARME; HIGH
11/11/09 19:25:30; RLD/PEN 04S9 DESARME COM FALHA 14S9-RLD (DISTANCIA); DESARME; HIGH

Causa-raiz

Cenário 10

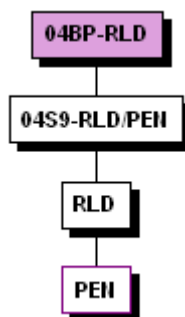
Dados do Simulop

E:R:000005:BKD :RLD :RLD:14S9:52 :ATUACAO 14S9-RLD-FLDI
 E:R:000005:BKT :PEN :PEN:14S9:52 :ATUACAO 14S9-PEN-TTTT
 E:R:000001:BKT :RLD :RLD:14S3:52 :ATUACAO 04BP-RLD-SOBT
 E:R:000001:BKT :RLD :RLD:14S4:52
 E:R:000001:BKT :RLD :RLD:14S5:52
 E:R:000001:BKT :RLD :RLD:14S2:52
 E:R:000001:BKT :RLD :RLD:14T1:52
 E:R:000001:BKT :RLD :RLD:14T3:52

Diagnósticos do Smart

11/11/09 19:27:42; RLD BLACKOUT; BLACKOUT; MAX
 11/11/09 19:27:42; PEN BLACKOUT; BLACKOUT; MAX
 11/11/09 19:26:46; RLD 04BP DESARME COM FALHA 14S9-RLD (SOBRETENSAO); DESARME; HIGH
 11/11/09 19:26:47; RLD/PEN 04S9 DESARME POR FALHA 14S9-RLD, SEM INDICACAO DE PROTECAO PEN, DEFEITO EX-TERNO; DESARME; HIGH

Causa-raiz

**Cenário 11**

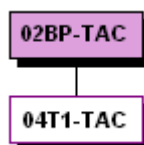
Dados do Simulop

E:R:000001:BKT :TAC :12V3-TAC
 E:R:000001:BKT :TAC :12V2-TAC :ATUACAO 02BP-TAC-SOBT
 E:R:000001:BKT :TAC :12V1-TAC
 E:R:000001:BKT :TAC :12V4-TAC
 E:R:000001:BKT :TAC :12T2-TAC
 E:R:000001:BKD :TAC :12T1-TAC :ATUACAO 12T1-TAC-FLDI
 E:R:000005:BKT :TAC :14T1-TAC
 E:R:000001:BKT :TAC :12T5-TAC

Diagnósticos do Smart

11/11/09 19:30:35; TAC 02BP DESARME COM FALHA 12T1-TAC (SOBRETENSAO); DESARME; HIGH
 11/11/09 19:30:37; TAC 04T1 DESARME COM FALHA 12T1-TAC; DESARME; HIGH

Causa-raiz



Cenário 12

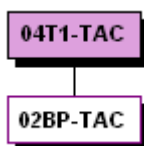
Dados do Simulop

E:R:000005:BKT :TAC :12V3-TAC
E:R:000005:BKT :TAC :12V2-TAC :ATUACAO 02A1-TAC-ATRB
E:R:000005:BKT :TAC :12V1-TAC
E:R:000005:BKT :TAC :12V4-TAC
E:R:000005:BKT :TAC :12T2-TAC
E:R:000001:BKD :TAC :12T1-TAC :ATUACAO 12T1-TAC-FLDI
E:R:000001:BKT :TAC :14T1-TAC :ATUACAO 04T1-TAC-PG1A
E:R:000001:BKT :TAC :12T5-TAC

Diagnósticos do Smart

11/11/09 19:33:40; TAC 02BP DESARME COM FALHA 12T1-TAC, PROTECAO 02A1-TAC; DESARME; HIGH
11/11/09 19:33:40; TAC 04T1 DESARME COM FALHA 12T1-TAC, COM IMPEDIMENTO (RELE DE GAS 2GRAU); DESARME;
HIGH

Causa-raiz

**Cenário 13**

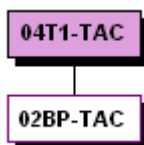
Dados do Simulop

E:R:000005:BKT :TAC :12V3-TAC
E:R:000005:BKT :TAC :12V2-TAC :ATUACAO 02BP-TAC-SOBT
E:R:000005:BKT :TAC :12V1-TAC
E:R:000005:BKT :TAC :12V4-TAC
E:R:000005:BKT :TAC :12T2-TAC
E:R:000001:BKD :TAC :12T1-TAC :ATUACAO 12T1-TAC-FLDI
E:R:000001:BKT :TAC :14T1-TAC :ATUACAO 04T1-TAC-TP3D
E:R:000001:BKT :TAC :12T5-TAC

Diagnósticos do Smart

11/11/09 19:35:21; TAC 02BP DESARME COM FALHA 12T1-TAC (SOBRETENSAO); DESARME; HIGH
11/11/09 19:35:20; TAC 04T1 DESARME COM FALHA 12T1-TAC (TEMPERATURA OLEO/ENROL); DESARME; HIGH

Causa-raiz



Cenário 14

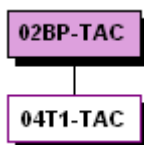
Dados do Simulop

E:R:000001:BKT :TAC :12V3-TAC
E:R:000001:BKT :TAC :12V2-TAC :ATUACAO 02BP-TAC-SOBT
E:R:000001:BKT :TAC :12V1-TAC
E:R:000001:BKT :TAC :12V4-TAC
E:R:000001:BKT :TAC :12T2-TAC
E:R:000001:BKD :TAC :12T1-TAC
E:R:000005:BKT :TAC :14T1-TAC
E:R:000001:BKT :TAC :12T5-TAC

Diagnósticos do Smart

11/11/09 19:38:38; TAC 02BP DESARME COM FALHA 12T1-TAC (SOBRETENSAO); DESARME; HIGH
11/11/09 19:38:41; TAC 04T1 DESARME COM FALHA 12T1-TAC; DESARME; HIGH

Causa-raiz

**Cenário 15**

Dados do Simulop

E:R:000005:BKT :TAC :12V3-TAC
E:R:000005:BKT :TAC :12V2-TAC :ATUACAO 02A1-TAC-SCON
E:R:000005:BKT :TAC :12V1-TAC
E:R:000005:BKT :TAC :12V4-TAC
E:R:000005:BKT :TAC :12T2-TAC
E:R:000001:BKT :TAC :12T1-TAC
E:R:000001:BKT :TAC :14T1-TAC :ATUACAO 04T1-TAC-PG1A
E:R:000001:BKT :TAC :12T5-TAC

Diagnósticos do Smart

11/11/09 19:39:53; TAC 02BP DESARME PROTECAO 02A1-TAC SOBRECORRENTE; DESARME; HIGH
11/11/09 19:39:53; TAC 04T1 DESARME COM IMPEDIMENTO (RELE DE GAS 2GRAU); DESARME; HIGH

Causa-raiz

02BP-TAC

04T1-TAC

Cenário 16

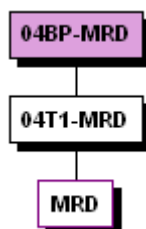
Dados do Simulop

E:R:000001:BKT :MRD :14F1-MRD
 E:R:000001:BKT :MRD :14F2-MRD :ATUACAO 04BP-MRD-SOBT
 E:R:000001:BKT :MRD :14F3-MRD
 E:R:000001:BKD :MRD :14T1-MRD :ATUACAO 14T1-MRD-FLDI
 E:R:000001:BKT :MRD :14T2-MRD
 E:R:000001:BKT :MRD :14T3-MRD
 E:R:000001:BKT :MRD :14T4-MRD
 E:R:000005:BKT :MRD :12T1-MRD :ATUACAO 04T1-MRD-RLBQ

Diagnósticos do Smart

11/11/09 19:43:22; MRD 04T1 DESARME COM FALHA 14T1-MRD; DESARME; HIGH
 11/11/09 19:43:22; MRD BLACKOUT; BLACKOUT; MAX
 11/11/09 19:42:21; MRD 04BP DESARME COM FALHA 14T1-MRD; DESARME; HIGH

Causa-raiz

**Cenário 17**

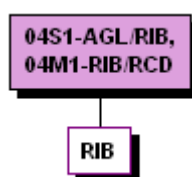
Dados do Simulop

E:R:000001:BKT :RCD :14M1-RCD :ATUACAO 04M1-RCD-PPZS
 E:R:000001:BKT :RIB :RIB:14M1:52 :ATUACAO 04M1-RIB-PPDF
 E:R:000001:BKT :AGL :14S1-AGL :ATUACAO 04S1-AGL-PPZS
 E:R:000001:BKT :RIB :RIB:14S1:52 :ATUACAO 04S1-RIB-PPZS

Diagnósticos do Smart

11/11/09 19:44:46; AGL/RIB 04S1 DESARME (DISTANCIA); DESARME; HIGH
 11/11/09 19:44:46; RIB/RCD 04M1 DESARME (DISTANCIA); DESARME; HIGH
 11/11/09 19:44:55; RIB BLACKOUT; BLACKOUT; MAX

Causa-raiz

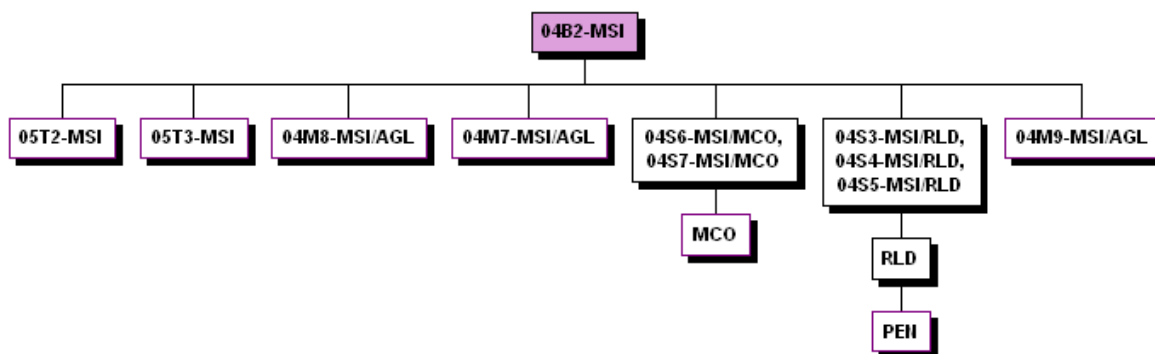


Cenário 18**Dados do Simulop**

E:R:000001:BKT :MSI :14T3-MSI :ATUACAO 05T3-MSI-ATR
 E:R:000001:BKT :MSI :14T2-MSI :ATUACAO 05T2-MSI-ATR
 E:R:000001:BKT :RLD :RLD:14S3:52 :ATUACAO 04S3-RLD-PPZS
 E:R:000001:BKT :RLD :RLD:14S4:52 :ATUACAO 04S4-RLD-PPZS
 E:R:000001:BKT :RLD :RLD:14S5:52 :ATUACAO 04S5-RLD-PPZS
 E:R:000001:BKT :MCO :MCO:14S6:52 :ATUACAO 04S6-MCO-PPZS
 E:R:000001:BKT :MCO :MCO:14S7:52 :ATUACAO 04S7-MCO-PPZS
 E:R:000001:BKT :AGL :14M8-AGL :ATUACAO 04M8-AGL-PPZS
 E:R:000001:BKT :AGL :14M9-AGL :ATUACAO 04M9-AGL-PPZS
 E:R:000001:BKT :AGL :14M7-AGL :ATUACAO 04M7-AGL-PPZS

Diagnósticos do Smart

11/11/09 19:46:23; RLD BLACKOUT;BLACKOUT;MAX] 11/11/09 19:46:15; MSI 05T2 DESARME DE ENROLAMENTO SECUN-
 DARIO; DESARME; HIGH
 11/11/09 19:46:15; MSI/AGL 04M8 DESARME TERMINAL AGL (DISTANCIA), DEFEITO EXTERNO; DESARME_LADO_PARA;
 HIGH
 11/11/09 19:46:15; MSI/RLD 04S3 DESARME TERMINAL RLD (DISTANCIA), DEFEITO EXTERNO; DESARME_LADO_PARA;
 HIGH
 11/11/09 19:46:15; MSI/MCO 04S6 DESARME TERMINAL MCO (DISTANCIA), DEFEITO EXTERNO; DE-
 SARME_LADO_PARA; HIGH
 11/11/09 19:46:15; MSI/MCO 04S7 DESARME TERMINAL MCO (DISTANCIA), DEFEITO EXTERNO; DE-
 SARME_LADO_PARA; HIGH
 11/11/09 19:46:15; MSI/RLD 04S4 DESARME TERMINAL RLD (DISTANCIA), DEFEITO EXTERNO; DESARME_LADO_PARA;
 HIGH
 11/11/09 19:46:15; MSI/AGL 04M9 DESARME TERMINAL AGL (DISTANCIA), DEFEITO EXTERNO; DESARME_LADO_PARA;
 HIGH
 11/11/09 19:46:15; MSI/AGL 04M7 DESARME TERMINAL AGL (DISTANCIA), DEFEITO EXTERNO; DESARME_LADO_PARA;
 HIGH
 11/11/09 19:46:15; MSI 05T3 DESARME DE ENROLAMENTO SECUNDARIO; DESARME; HIGH
 11/11/09 19:46:23; MCO BLACKOUT; BLACKOUT; MAX
 11/11/09 19:46:15; MSI/RLD 04S5 DESARME TERMINAL RLD (DISTANCIA), DEFEITO EXTERNO; DESARME_LADO_PARA;
 HIGH
 11/11/09 19:46:23; PEN BLACKOUT; BLACKOUT; MAX

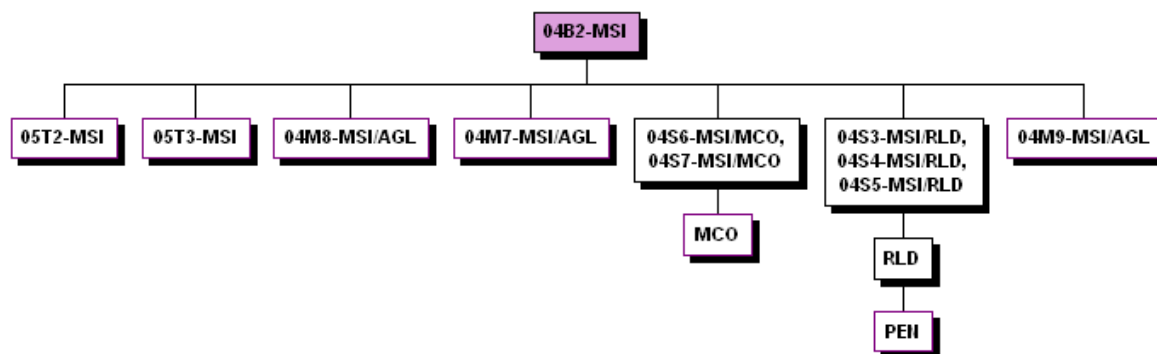
Causa-raiz

Cenário 19**Dados do Simulop**

E:R:000001:BKT :MSI :14T3-MSI :ATUACAO 05T3-MSI-ATRB
 E:R:000001:BKT :MSI :14T2-MSI :ATUACAO 05T2-MSI-ATRB
 E:R:000001:BKT :RLD :RLD:14S3:52 :ATUACAO 04S3-RLD-PPZS
 E:R:000001:BKT :RLD :RLD:14S4:52 :ATUACAO 04S4-RLD-PPZS
 E:R:000001:BKT :RLD :RLD:14S5:52 :ATUACAO 04S5-RLD-PPZS
 E:R:000001:BKT :MCO :MCO:14S6:52 :ATUACAO 04S6-MCO-PPZS
 E:R:000001:BKT :MCO :MCO:14S7:52 :ATUACAO 04S7-MCO-PPZS
 E:R:000001:BKT :AGL :14M8-AGL :ATUACAO 04M8-AGL-PPZS
 E:R:000001:BKT :AGL :14M9-AGL :ATUACAO 04M9-AGL-PPZS
 E:R:000001:BKT :AGL :14M7-AGL :ATUACAO 04M7-AGL-PPZS
 E:R:000001:BKT :MSI :14S3-MSI :ATUACAO 04S3-MSI-PPZI
 E:R:000001:BKT :MSI :14S4-MSI :ATUACAO 04S4-MSI-PPZI
 E:R:000001:BKT :MSI :14S5-MSI :ATUACAO 04S5-MSI-PPZI

Diagnósticos do Smart

11/11/09 19:48:44; RLD BLACKOUT; BLACKOUT; MAX
 11/11/09 19:48:05; MSI 05T2 DESARME DE ENROLAMENTO SECUNDARIO; DESARME; HIGH
 11/11/09 19:48:05; MSI/AGL 04M8 DESARME TERMINAL AGL (DISTANCIA), DEFEITO EXTERNO; DESARME_LADO_PARA; HIGH
 11/11/09 19:48:05; MSI/RLD 04S3 DESARME (DISTANCIA); DESARME; HIGH
 11/11/09 19:48:05; MSI/MCO 04S6 DESARME TERMINAL MCO (DISTANCIA), DEFEITO EXTERNO; DESARME_LADO_PARA; HIGH
 11/11/09 19:48:05; MSI/MCO 04S7 DESARME TERMINAL MCO (DISTANCIA), DEFEITO EXTERNO; DESARME_LADO_PARA; HIGH
 11/11/09 19:48:05; MSI/RLD 04S4 DESARME (DISTANCIA); DESARME; HIGH
 11/11/09 19:48:05; MSI/AGL 04M9 DESARME TERMINAL AGL (DISTANCIA), DEFEITO EXTERNO; DESARME_LADO_PARA; HIGH
 11/11/09 19:48:05; MSI/AGL 04M7 DESARME TERMINAL AGL (DISTANCIA), DEFEITO EXTERNO; DESARME_LADO_PARA; HIGH
 11/11/09 19:48:05; MSI 05T3 DESARME DE ENROLAMENTO SECUNDARIO; DESARME; HIGH
 11/11/09 19:48:44; MCO BLACKOUT; BLACKOUT; MAX
 11/11/09 19:48:05; MSI/RLD 04S5 DESARME (DISTANCIA); DESARME; HIGH
 11/11/09 19:48:44; PEN BLACKOUT; BLACKOUT; MAX

Causa-raiz

Cenário 20

Dados do Simulop

E:R:000001:BKT :MCO :MCO:14T1:52 :ATUACAO 04T1-MCO-ATRB

E:R:000001:BKT :MCO :MCO:14T2:52 :ATUACAO 04T2-MCO-ATRB

E:R:000001:BKT :MCO :MCO:14T3:52 :ATUACAO 04T3-MCO-ATRB

E:R:000001:BKT :MCO :MCO:14T4:52 :ATUACAO 04T4-MCO-ATRB

Diagnósticos do Smart

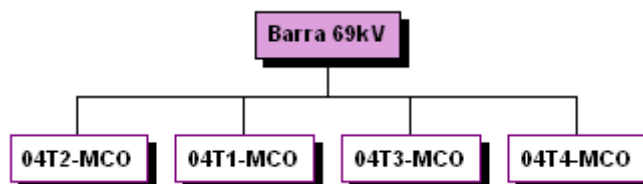
12/11/09 12:30:20;MCO 04T4 DESARME COM BLOQUEIO; DESARME; HIGH

12/11/09 12:30:20;MCO 04T2 DESARME COM BLOQUEIO; DESARME; HIGH

12/11/09 12:30:20;MCO 04T3 DESARME COM BLOQUEIO; DESARME; HIGH

12/11/09 12:30:20;MCO 04T1 DESARME COM BLOQUEIO; DESARME; HIGH

Causa-raiz

**Cenário 21**

Dados do Simulop

E:R:000001:BKT :MRD :14T1-MRD :ATUACAO 04T1-MRD-PG1A

E:R:000001:BKT :MRD :12T1-MRD

E:R:000001:BKT :MRD :14T2-MRD :ATUACAO 04T2-MRD-PG1A

E:R:000001:BKT :MRD :12T2-MRD

E:R:000001:BKT :MRD :14T3-MRD :ATUACAO 04T3-MRD-PG1A

E:R:000001:BKT :MRD :12T3-MRD

E:R:000001:BKT :MRD :14T4-MRD :ATUACAO 04T4-MRD-PG1A

E:R:000001:BKT :MRD :12T4-MRD

Diagnósticos do Smart

12/11/09 12:50:55; MRD 04T1 DESARME COM IMPEDIMENTO (RELE DE GAS 2GRAU); DESARME; HIGH

12/11/09 12:50:55; MRD 04T2 DESARME COM IMPEDIMENTO (RELE DE GAS 2GRAU); DESARME; HIGH

12/11/09 12:50:55; MRD 04T3 DESARME COM IMPEDIMENTO (RELE DE GAS 2GRAU); DESARME; HIGH

12/11/09 12:50:55; MRD 04T4 DESARME COM IMPEDIMENTO (RELE DE GAS 2GRAU); DESARME; HIGH

Causa-raiz

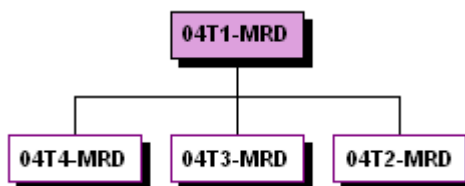


Cenário 22**Dados do Simulop**

E:R:000001:BKT :MRD :14T1-MRD :ATUACAO 04T1-MRD-PG1A
E:R:000001:BKT :MRD :12T1-MRD
E:R:000001:BKT :MRD :14T2-MRD :ATUACAO 04T2-MRD-SGLQ
E:R:000001:BKT :MRD :12T2-MRD
E:R:000001:BKT :MRD :14T3-MRD :ATUACAO 04T3-MRD-SGLQ
E:R:000001:BKT :MRD :12T3-MRD
E:R:000001:BKT :MRD :14T4-MRD :ATUACAO 04T4-MRD-SGLQ
E:R:000001:BKT :MRD :12T4-MRD

Diagnósticos do Smart

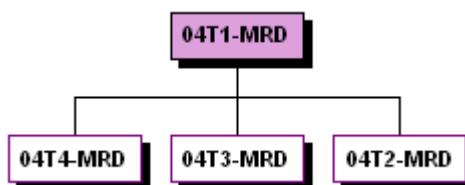
12/11/09 12:52:35; MRD 04T1 DESARME COM IMPEDIMENTO (RELE DE GAS 2GRAU); DESARME; HIGH
12/11/09 12:52:35; MRD 04T2 DESARME (SOBRECORRENTE); DESARME; HIGH
12/11/09 12:52:35; MRD 04T3 DESARME (SOBRECORRENTE); DESARME; HIGH
12/11/09 12:52:35; MRD 04T4 DESARME (SOBRECORRENTE); DESARME; HIGH

Causa-raiz**Cenário 23****Dados do Simulop**

E:R:000001:BKT :MRD :14T1-MRD :ATUACAO 04T1-MRD-SGLQ
E:R:000001:BKT :MRD :12T1-MRD
E:R:000010:BKT :MRD :14T2-MRD :ATUACAO 04T2-MRD-SGLQ
E:R:000010:BKT :MRD :12T2-MRD
E:R:000010:BKT :MRD :14T3-MRD :ATUACAO 04T3-MRD-SGLQ
E:R:000010:BKT :MRD :12T3-MRD
E:R:000010:BKT :MRD :14T4-MRD :ATUACAO 04T4-MRD-SGLQ
E:R:000010:BKT :MRD :12T4-MRD

Diagnósticos do Smart

12/11/09 12:57:21; MRD 04T1 DESARME (SOBRECORRENTE); DESARME; HIGH
12/11/09 12:57:31; MRD 04T2 DESARME (SOBRECORRENTE); DESARME; HIGH
12/11/09 12:57:31; MRD 04T3 DESARME (SOBRECORRENTE); DESARME; HIGH
12/11/09 12:57:31; MRD 04T4 DESARME (SOBRECORRENTE); DESARME; HIGH

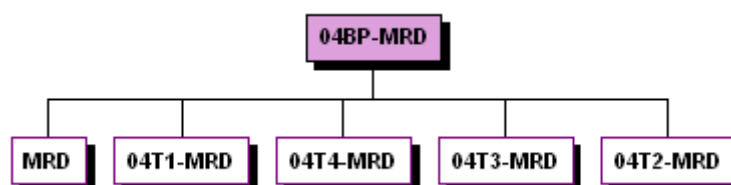
Causa-raiz

Cenário 24**Dados do Simulop**

E:R:000001:BKT :MRD :14T1-MRD :ATUACAO 04T1-MRD-SGLQ
 E:R:000001:BKT :MRD :12T1-MRD
 E:R:000001:BKT :MRD :14T2-MRD :ATUACAO 04T2-MRD-SGLQ
 E:R:000001:BKT :MRD :12T2-MRD
 E:R:000001:BKT :MRD :14T3-MRD :ATUACAO 04T3-MRD-PG1A
 E:R:000001:BKT :MRD :12T3-MRD
 E:R:000001:BKT :MRD :14T4-MRD :ATUACAO 04T4-MRD-SGLQ
 E:R:000001:BKT :MRD :12T4-MRD
 E:R:000001:BKT :MRD :14F1-MRD :ATUACAO 04BP-MRD-SOBT
 E:R:000001:BKT :MRD :14F2-MRD
 E:R:000001:BKT :MRD :14F3-MRD

Diagnósticos do Smart

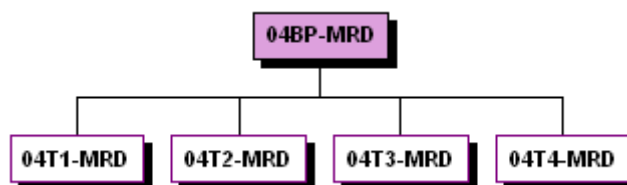
12/11/09 12:59:13; MRD 04BP DESARME (SOBRETENSAO); DESARME; HIGH
 12/11/09 12:59:13; MRD 04T1 DESARME (SOBRECORRENTE); DESARME; HIGH
 12/11/09 12:59:13; MRD 04T2 DESARME (SOBRECORRENTE); DESARME; HIGH
 12/11/09 12:59:13; MRD 04T3 DESARME COM IMPEDIMENTO (RELE DE GAS 2GRAU); DESARME; HIGH
 12/11/09 12:59:49; MRD BLACKOUT; BLACKOUT; MAX
 12/11/09 12:59:13; MRD 04T4 DESARME (SOBRECORRENTE); DESARME; HIGH

Causa-raiz**Cenário 25****Dados do Simulop**

E:R:000001:BKT :MRD :14T1-MRD :ATUACAO 04T1-MRD-SCLD
 E:R:000001:BKT :MRD :14T2-MRD :ATUACAO 04T2-MRD-SCLD
 E:R:000001:BKT :MRD :14T3-MRD :ATUACAO 04T3-MRD-SCLD
 E:R:000001:BKT :MRD :14T4-MRD :ATUACAO 04T4-MRD-SCLD
 E:R:000001:BKT :MRD :12T1-MRD
 E:R:000001:BKT :MRD :12T2-MRD
 E:R:000001:BKT :MRD :12T3-MRD
 E:R:000001:BKT :MRD :12T4-MRD

Diagnósticos do Smart

27/11/09 16:53:47; MRD 04T4 DESARME (SOBRECORRENTE FASES); DESARME; HIGH
 27/11/09 16:53:47; MRD 04T3 DESARME (SOBRECORRENTE FASES); DESARME; HIGH
 27/11/09 16:53:47; MRD 04T2 DESARME (SOBRECORRENTE FASES); DESARME; HIGH
 27/11/09 16:53:47; MRD 04T1 DESARME (SOBRECORRENTE FASES); DESARME; HIGH

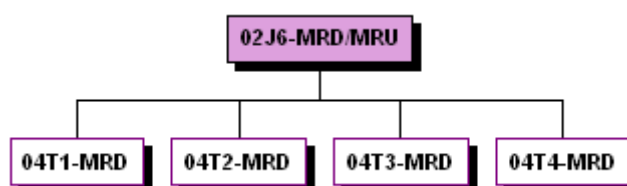
Causa-raiz

Cenário 26**Dados do Simulop**

E:R:000002:BKT :MRD :14T1-MRD :ATUACAO 04T1-MRD-SCLD
 E:R:000002:BKT :MRD :12T1-MRD
 E:R:000002:BKT :MRD :14T2-MRD :ATUACAO 04T2-MRD-SCLD
 E:R:000002:BKT :MRD :12T2-MRD
 E:R:000002:BKT :MRD :14T3-MRD :ATUACAO 04T3-MRD-SCLD
 E:R:000002:BKT :MRD :12T3-MRD
 E:R:000002:BKT :MRD :14T4-MRD :ATUACAO 04T4-MRD-SCLD
 E:R:000002:BKT :MRD :12T4-MRD
 E:R:000001:BKT :MRD :12J6-MRD :ATUACAO 02J6-SCON-MRD

Diagnósticos do Smart

27/11/09 17:34:12; MRD 04T3 DESARME (SOBRECORRENTE FASES); DESARME; HIGH
 27/11/09 17:34:12; MRD 04T4 DESARME (SOBRECORRENTE FASES); DESARME; HIGH
 27/11/09 17:34:12; MRD 04T2 DESARME (SOBRECORRENTE FASES); DESARME; HIGH
 27/11/09 17:34:11; MRD/MRU 02J6 DESARME (SOBRECORRENTE); DESARME; HIGH
 27/11/09 17:34:12; MRD 04T1 DESARME (SOBRECORRENTE FASES); DESARME; HIGH

Causa-raiz**Cenário 27****Dados do Simulop**

E:R:000001:BKT :MRD :14F1-MRD
 E:R:000001:BKT :MRD :14F2-MRD :ATUACAO 02A1-MRD-SCON
 E:R:000001:BKT :MRD :14F3-MRD
 E:R:000001:BKT :MRD :14T1-MRD :ATUACAO 14T1-MRD-FLDI
 E:R:000001:BKT :MRD :14T2-MRD
 E:R:000001:BKT :MRD :14T3-MRD
 E:R:000001:BKT :MRD :14T4-MRD
 E:R:000001:BKT :MRD :12T1-MRD :ATUACAO 04T1-MRD-ATRB
 E:R:000001:BKT :MRD :12T2-MRD
 E:R:000001:BKT :MRD :12T3-MRD
 E:R:000001:BKT :MRD :12T4-MRD

Diagnósticos do Smart

27/11/09 11:44:43; MRD 02BP DESARME PROTECAO 02A1-MRD SOBRECORRENTE; DESARME; HIGH
 27/11/09 11:44:43; MRD 04T1 DESARME COM BLOQUEIO, COM FALHA 14T1-MRD; DESARME; HIGH
 27/11/09 11:44:43; MRD 04BP DESARME COM FALHA 14T1-MRD; DESARME; HIGH
 27/11/09 11:45:43; MRD BLACKOUT; BLACKOUT; MAX

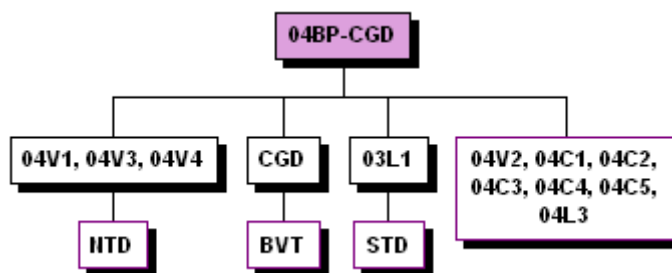
Causa-raiz

Cenário 28

Diagnósticos do Smart

- BLACKOUT - Subestação SMD
- BLACKOUT - Subestação CRD
- BLACKOUT - Subestação STD
- BLACKOUT - Subestação NTD
- BLACKOUT - Subestação CGD
- BLACKOUT - Subestação BVT
- DESARME - Terminal de Linha TAC 04C1 (TAC/CGD) (DefeitoExterno)
- DESARME - Terminal de Linha TAC 04C2 (TAC/CGD) (DefeitoExterno)
- DESARME - Terminal de Linha PFE 04C3 (PFE/CGD) (DefeitoExterno)
- DESARME - Terminal de Linha PFE 04C4 (PFE/CGD) (DefeitoExterno)
- DESARME - Terminal de Linha AGL 04C5 (AGL/CGD) (DefeitoExterno)
- DESARME - Terminal de Linha GNN 04L3 (GNN/CGD) (DefeitoExterno)
- DESARME - Terminal de Linha STD 03L1 (STD/CGD)
- DESARME - Terminal de Linha NTD 04V1 (NTD/CGD)
- DESARME - Terminal de Linha PRS 04V2 (PRS/CGD) (DefeitoExterno)
- DESARME - Terminal de Linha NTD 04V3 (NTD/CGD) (DefeitoExterno)
- DESARME - Terminal de Linha NTD 04V4 (NTD/CGD) (DefeitoExterno)
- DESARME - Linha 04N2-NTD/PRS
- DESARME - Terminal de Linha CRD 03M2 (CRD/STD)
- DESARME - Terminal de Linha CRD 03C1 (SMD/CRD)
- DESARME - Terminal de Linha SMD 03C2 (SMD/ACD)

Causa-raiz



Apêndice B

Regras

Este apêndice apresenta as regras levantadas no estudo de caso apresentado no Capítulo 4. Estão separadas por *regras de causa-raiz* e *regras de relacionamento e propagação*.

B.1 Regras de Causa-Raiz

```
R.CR.1.  SE existe(TERMINALLINHA_1.desarme) &
TERMINALLINHA_1.existeAtributo(DefeitoExterno) &
existe(TERMINALLINHA_2.desarme) &
TERMINALLINHA_2.existeAtributo(DefeitoExterno) & ... &
existe(TERMINALLINHA_n.desarme) &
TERMINALLINHA_n.existeAtributo(DefeitoExterno) &
existeBarraEmComumLinhas(LINHA_1, LINHA_2, ..., LINHA_n) &
!(TERMINALLINHA_m.existeAtributo(DefeitoInterno) &
TERMINALLINHA_m.existeAtributo(FalhaDJ)) &
desenergizada(barraEmComum(LINHA_1, LINHA_2, ..., LINHA_n))
ENTAO éCausaRaiz(barraEmComum(LINHA_1, LINHA_2, ...,
LINHA_n))
```

```
R.CR.2.  SE existe(LINHA_1.desarme) &
LINHA_1.existeAtributo(DefeitoInterno) &
!(existe(BARRA.defeito) & estaoConectados(LINHA_1, BARRA)) &
```

```

!(existe(BARRA.desarme) & estaoConectados(LINHA_1, BARRA) &
BARRA.existeAtributo(AtuaçãoDaProteção) &
BARRA.existeAtributo(FalhaDJ_a) &
LINHA_1.existeAtributo(FalhaDJ_a)) &
!(LINHA_1.existeAtributo(FalhaDJ) &
existe(BARRA.desarme) & estaoConectados(LINHA_1, BARRA) &
existe(LINHA_2.desarme) &
LINHA_2.existeAtributo(DefeitoExterno) &
estaoConectados(LINHA_2, BARRA) & ... &
existe(LINHA_n.desarme) &
LINHA_n.existeAtributo(DefeitoExterno) &
estaoConectados(LINHA_n, BARRA)) &
!(existe(BARRA_a.desarme) & éBarraDupla(Barra_a, Barra_b) &
estaoConectados(LINHA_1, BARRA_b) )
ENTAO éCausaRaiz(LINHA_1)

```

```

R.CR.3. SE existe(TRAFO_1.desarme) &
LINHA_1.existeAtributo(DefeitoIntrinseco) &
!(existe(BARRA.desarme) & estaoConectados(TRAFO_1, BARRA) &
BARRA.existeAtributo(AtuaçãoDaProteção) &
BARRA.existeAtributo(FalhaDJ_a) &
TRAFO_1.existeAtributo(FalhaDJ_a)) &
!( !TRAFO_1.existeAtributo(FalhaDJ) &
existe(BARRA.desarme) & estaoConectados(TRAFO_1, BARRA) &
existe(TRAFO_2.desarme) & estaoConectados(TRAFO_2, BARRA) &
... &
existe(TRAFO_n.desarme) & estaoConectados(TRAFO_n, BARRA) )
ENTAO éCausaRaiz(TRAFO_1)

```

```

R.CR.4. SE existe(BARRA.desarmeSobrecorrenteNeutroTrafoTerra)
& existe(X.desarme) & estãoConectados(X, BARRA)

```

ENTAO SE X.existeAtributo(FalhaDJ)

ENTAO éCausaRaiz(X)

SENAO éCausaRaiz(BARRA)

R.CR.5. SE existe(BARRA.desarmeProteçãoIntrínsecaTrafoTerra)
&

existe(X.desarme) & X.existeAtributo(FalhaDJ) &
estãoConectados(X, BARRA)

ENTAO éCausaRaiz(Defeito trafo terra X)

R.CR.6. SE existe(BARRA.desarme) &

!BARRA.existeAtributo(FalhaDJ)

ENTAO éCausaRaiz(BARRA)

R.CR.7. SE existe(TRAFO_1.desarme) &

existe(TRAFO_2.desarme) & ... & existe(TRAFO_n.desarme) &

existeBarraEmComum(TRAFO_1, TRAFO_2, ..., TRAFO_n) &

!desarmesNoMesmoSegundo(TRAFO_1, TRAFO_2, ..., TRAFO_n) &

TRAFO_1.tempo < TRAFO_2.tempo & ... &

TRAFO_1.tempo < TRAFO_n.tempo

ENTAO éCausaRaiz(TRAFO_1)

R.CR.8. SE existe(TRAFO_1.desarme) &

existe(TRAFO_2.desarme) & ... & existe(TRAFO_n.desarme) &

existeBarraEmComum(TRAFO_1, TRAFO_2, ..., TRAFO_n) &

desarmesNoMesmoSegundo(TRAFO_1, TRAFO_2, ..., TRAFO_n)

ENTAO éCausaRaiz(BarraemComum(TRAFO_1, TRAFO_2, ...,

TRAFO_n))

R.CR.9. SE existe(X_1.desarme) &

existe(X_2.desarme) & ... & existe(X_n.desarme)

ENTAO éCausaRaiz (menorTempo (X_1, X_2, ..., X_n))

B.2 Regras de Relacionamento e Propagação

R.RP.1. SE existe (BARRA.desarme) & existe (X.desarme) & estãoConectados (X, BARRA)

ENTAO relacionar (X, BARRA)

R.RP.2 SE existe (SE.blackout) & existe (BARRA.desarme) & BARRA.subestação = SE & éBarraDeMaiorTensão (BARRA)

ENTAO Barra.desarme causou SE.blackout

SENAO SE existe (SE.blackout) & existe (LINHA.desarme) & LinhaDeEntrada (SE, LINHA)

ENTAO LINHA.desarme **causou** SE.blackout

SENAO SE existe (SE.blackout) & existe (BARRA.desarme) & sãoVizinhas (SE, BARRA.subestação) & éBarraDeMaiorTensão (BARRA)

ENTAO BARRA.desarme **causou** SE.blackout

SENAO SE existe (SE.blackout) & existe (SE_2.blackout) & sãoVizinhas (SE, SE_2)

ENTAO relacionar (SE, SE_2)

Regra de definição de Linha de Entrada:

SE uma subestação está em anel **ENTAO** suas linhas de entrada são todas as linhas que estão conectadas à subestação e à subestação vizinha que também seja um anel.

SE uma subestação não está em anel (é radial) **ENTAO** suas linhas de entrada são todas as linhas com o lado *PARA* da subestação.

R.RP.3. SE existe (LINHA.desarme) &

LINHA.existeAtributo(DefeitoInterno) &
LINHA.existeAtributo(FalhaDJ) &
existe(TERMINALLINHA.desarme) &
TERMINALLINHA.existeAtributo(DefeitoExterno) &
mesmaAreaProteção(TERMINALLINHA, LINHA)
ENTAO LINHA.desarme **causou** TERMINALLINHA.desarme

R.RP.4. SE existe(TRAFO_1.desarme) &
existe(TRAFO_2.desarme) & ... & existe(TRAFO_n.desarme) &
existeBarraEmComum(TRAFO_1, TRAFO_2, ..., TRAFO_n) &
TRAFO_1.existeAtributo(DefeitoInterno) &
!TRAFO_2.existeAtributo(DefeitoInterno) & ... &
!TRAFO_n.existeAtributo(DefeitoInterno)
ENTAO TRAFO_1.desarme **causou** TRAFO_2.desarme, ...,
TRAFO_n.desarme

R.RP.5. SE éCausaRaiz(X.desarme) &
estáRelacionado(X.desarme, Y.desarme) & !écausaRaiz(Y.desarme)
ENTAO X.desarme **causou** Y.desarme

R.RP.6. SE existe(X.desarme) & existe(SE_1.blackout) &
estáRelacionado(X.desarme, SE_1.blackout)
ENTAO X.desarme **causou** SE_1.blackout