

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
COORDENAÇÃO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

SIDNEI PEREIRA

**DIAGNÓSTICO AUTOMÁTICO DE FALTAS EM SUBESTAÇÕES DE
TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA UTILIZANDO SEQUÊNCIA
DE EVENTOS**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PATO BRANCO

2011

SIDNEI PEREIRA

**DIAGNÓSTICO AUTOMÁTICO DE FALTAS EM SUBESTAÇÕES DE
TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA UTILIZANDO SEQUÊNCIA
DE EVENTOS**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do Curso de Engenharia Elétrica da Coordenação de Engenharia Elétrica – COELT – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Campus Pato Branco, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro.

Orientador: Prof. Dr. Miguel Moreto

PATO BRANCO

2011

DEDICATÓRIA

À família:

Juliane Dalponte Pereira (esposa)

Paulo Pereira (Pai)

Tecla Pereira (Mãe)

À um grande incentivador:

Antonio Darci Filachoski

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Dr. Miguel Moreto pela excelente sugestão de tema e pela sua dedicação na orientação deste trabalho.

A Companhia Paranaense de Energia Elétrica – Copel por autorizar o uso dos dados necessários para a realização dos testes do sistema proposto.

A Universidade Tecnológica Federal do Paraná por ceder o espaço físico para a realização dos estudos, especialmente o laboratório do Grupo de Pesquisa em Análise e Processamento de Energia - PROCEN.

Aos operadores e colegas da Subestação Pato Branco pela sua colaboração na formação da base de conhecimento do trabalho.

EPIGRAFE

Ensinar não é transferir conhecimento, mas criar as possibilidades para a sua produção ou a sua construção.
(FREIRE, Paulo, 1996).

RESUMO

PEREIRA, Sidnei. Diagnóstico automático de faltas em subestações de transmissão de energia elétrica utilizando sequência de eventos. 2011. 50 f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Coordenação de Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2011.

Este trabalho apresenta uma visão geral da operação dos sistemas elétricos de potência com a evolução das tecnologias, bem como uma revisão conceitual sobre sequências de eventos produzidas em faltas no sistema elétrico de potência e também sua utilização pelas equipes de operação em tempo real. Discute-se os problemas consequentes do grande volume de alarmes produzidos em faltas no sistema elétrico e as dificuldades encontradas em analisar estas informações, para decifrar as causas das perturbações. São apresentadas as metodologias atualmente usadas para realizar a análise automática de faltas no sistema elétrico e citados alguns estudos recentes. É avaliada a implementação de sistemas computacionais capazes de realizar a tarefa de análise automática das sequências de eventos produzidas durante a ocorrência de faltas que ocasionam desligamentos permanentes no sistema elétrico. Para isso foi proposto e desenvolvido um sistema especialista, baseado em técnicas de inteligência artificial, para ser utilizado como ferramenta de auxílio a operação em tempo real. O sistema especialista foi submetido a testes com dados de sequências de eventos de faltas reais, fornecidos por uma concessionária de energia elétrica. A partir dos resultados obtidos nos testes e da comparação com as análises manuais feitas nos dados verificou-se a viabilidade da implementação do sistema proposto para a análise automática de faltas. Foram identificadas limitações e benefícios do uso dos sistemas automáticos.

Palavras-chave: Análise automática, sequência de eventos, sistema elétrico de potência, sistemas especialistas.

ABSTRACT

PEREIRA, Sidnei. Automated fault analysis in power transmission substations using sequence of events. 2011. 50 f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Coordenação de Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2011.

This work presents a general view of power systems operation considering technological evolution of information systems occurred during the last few years. It also show a conceptual review of sequence of events recorded during power system faults and its use by the real time operation crew. The consequences of the large amount of data generated due to fault and the difficulties in analyzing it are also discussed. Some recent studies related with automated analysis of faults in power systems are reviewed, leading to a verification of the computational systems capable of performing an automated analysis of sequence of events recorded during faults. These faults may result in power outages and have to be analyzed as fast as possible in order to provide the operators with enough information to take corrective actions. In order to help the operators with their task this work propose the development of an expert system, which is based on artificial intelligence techniques, to be employed as an auxiliary tool. The proposed expert system is tested with sequence of events recorded during real fault cases provided by a power system utility. The comparison of the results obtained by the proposed scheme with the manual analyses from the operators lead to the verification of the viability of implementing such system in automated fault analysis. This work also shows the limitations and benefits of using automated fault analysis schemes.

Keywords: Automatic analysis, sequence of events, power system, expert systems.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Estrutura de sistema de supervisão e controle.	6
Figura 2: Exemplo de sequência de eventos.....	14
Figura 3: Partes que compõem um SE.	20
Figura 4: Diagrama unifilar da subestação protótipo usada no sistema.	23
Figura 5: Representação das proteções dos elementos da subestação protótipo. ...	26
Figura 6: Diagrama em blocos do sistema proposto.	28
Figura 7: Fatos iniciais de uma falta em LT.....	39
Figura 8: Resultado da análise automática de uma falta em LT.....	39
Figura 9: Fatos iniciais de uma falha de DJ.....	40
Figura 10: Resultado da análise automática de uma falha de DJ.	41
Figura 11: Fatos iniciais de uma falta em BC.....	42
Figura 12: Resultado da análise automática de uma falta em BC.....	42
Figura 13: Memória de trabalho atualizada após a análise automática.....	43
Figura 14: Fatos de uma manobra no SEP.	44
Figura 15: Resultado da análise automática de uma manobra.	45

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Proteções típicas por elemento.	24
Quadro 2: Formato do relatório do protótipo com campos da SOE.....	29
Quadro 3: Exemplo de fatos extraídos do relatório de SOE.....	30
Quadro 4: Exemplo de regra para falta em linha de transmissão.....	31
Quadro 5: Exemplo de fatos para falta em transformador.....	33
Quadro 6: Exemplo de regras para faltas em transformador.	33
Quadro 7: Fatos produzidos pelas regras 2 e 3.	34
Quadro 8: Regras de primeiro nível que formam o módulo 2: base de regras	35
Quadro 9: Regras de segundo nível que formam o módulo 2: base de regras	36

LISTA DE SIGLAS

Aneel	Agência nacional de energia elétrica
API	Interface de programação de aplicativos
AT	Alta tensão
BC	Banco de capacitor
BP	Barra principal
BT	Barra de transferência
Cemig	Companhia energética de Minas Gerais
CLIPS	<i>C Language Integrated Production System</i>
Copel	Companhia paranaense de energia elétrica
COS	Centro de operação do sistema
DJ	Disjuntor
IHM	Interface homem maquina
IHM	Interface homem-máquina
LT	Linha de transmissão
NASA	Agência Espacial Americana
ONS	Operador nacional do sistema
RNA	Redes neurais artificiais
SE	Sistema especialista
SEP	Sistema elétrico de potência
SIN	Sistema interligado nacional
SOE	Sequência de eventos
TC	Transformador de corrente
TR	Transformador
UCC	Unidade central de controle
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
UTR	Unidade terminal remota

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	5
1.1 MOTIVAÇÃO	7
1.2 DESAFIO	8
1.3 OBJETIVOS	8
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO	9
2. ESTADO DA ARTE	11
2.1 SEQUÊNCIA DE EVENTOS - SOE	11
2.2 METODOLOGIAS EMPREGADAS NA ANÁLISE AUTOMÁTICA	16
2.3 DELIMITAÇÃO DO PROBLEMA E SOLUÇÃO PROPOSTA	17
3. DESENVOLVIMENTO	19
3.1 METODOLOGIA	19
3.2 ASPECTOS GERAIS DO SEP	21
3.2.1 Subestação protótipo	22
3.2.2 Elementos e suas proteções típicas	23
3.3 IMPLEMENTAÇÃO DA BASE DE CONHECIMENTO	27
3.3.1 Módulo 1: aquisição de fatos do relatório de SOE	28
3.3.2 Módulo 2: base de regras para interpretação dos fatos	30
4. RESULTADOS	38
4.1 ESTUDO DE CASO: FALTA EM LINHA DE TRANSMISSÃO	38
4.2 ESTUDO DE CASO: FALHA DE DISJUNTOR	40
4.3 ESTUDO DE CASO: FALTA EM BANCO DE CAPACITOR	41
4.4 ESTUDO DE CASO: MANOBRAS E ENSAIOS EM PROTEÇÃO	44
4.5 ANÁLISE QUALITATIVA DOS RESULTADOS	45
5. CONCLUSÕES E FUTUROS TRABALHOS	47
6. REFERÊNCIAS	49

1. INTRODUÇÃO

Na última década vivenciou-se uma grande disseminação de tecnologias e conhecimentos que permitiram a implantação de diversos sistemas de tecnologia da informação nos mais diferentes ramos de nossa sociedade. Parte desta disseminação se deve a nanotecnologia, que possibilitou o barateamento dos custos de produção de equipamento eletro-eletrônicos de uso geral, como microcomputadores, ou de uso específicos. Outra parte certamente se deve a avanços na área de educação, que oportunizaram a profissionalização dos mais diversos ramos da sociedade.

Não distantes desta realidade, as concessionárias de energia elétrica também passaram por evoluções nos últimos anos. Viu-se o emprego em massa de tecnologias de informação, desde os níveis gerenciais, até os níveis operacionais, nas subestações. Atualmente o setor elétrico passa por uma migração dos sistemas de controle anteriormente baseados em tecnologias eletromecânicas e eletrônica analógica para o paradigma da tecnologia digital, o que, no contexto deste setor, é chamado “Automação de Subestações” (PEREIRA; SPRITZER, 2007).

Além disto, ocorreu a regulamentação do setor, através da criação do Operador Nacional do Sistema (ONS), uma entidade privada, composta por representantes dos diversos agentes do setor, dos consumidores e da União, que possui dentre outras, a função de administrar a rede básica de transmissão. Também foi criada a Agência nacional de energia elétrica (Aneel), que tornou o setor elétrico muito mais competitivo, pois hoje opera em mercado aberto (SERRATO, 2006).

A evolução trouxe grandes melhorias, como as medidas e registros automáticos de dados, possibilitando o monitoramento e execução de comandos a distância reduzindo os riscos e os custos operacionais. Assim, com o passar dos anos, tornou-se cada vez menor a demanda por operadores nas instalações, pois, com a melhoria dos sistemas de comunicação, foi possível passar a operar remotamente os equipamentos e conseqüentemente as instalações que compõem o sistema, como as subestações de transmissão e usinas.

Esta evolução foi e continua sendo muito benéfica para as concessionárias de energia, melhorando o desempenho de seus sistemas e tornando-as mais competitivas no mercado atual.

O processo de automação de subestações vem empregando tecnologias com predominância da eletrônica digital, como microprocessadores e memórias. Os dispositivos de proteção (relés) são microprocessados com funções de controle e de proteção, além de possibilitarem a comunicação através de fibras ópticas. Computadores pessoais fazem o papel de Interface Homem Máquina (IHM) para a supervisão e controle nas salas de comando (PEREIRA; SPRITZER, 2007). A Figura 1 mostra uma arquitetura típica de um sistema de supervisão e controle aplicado em subestações.

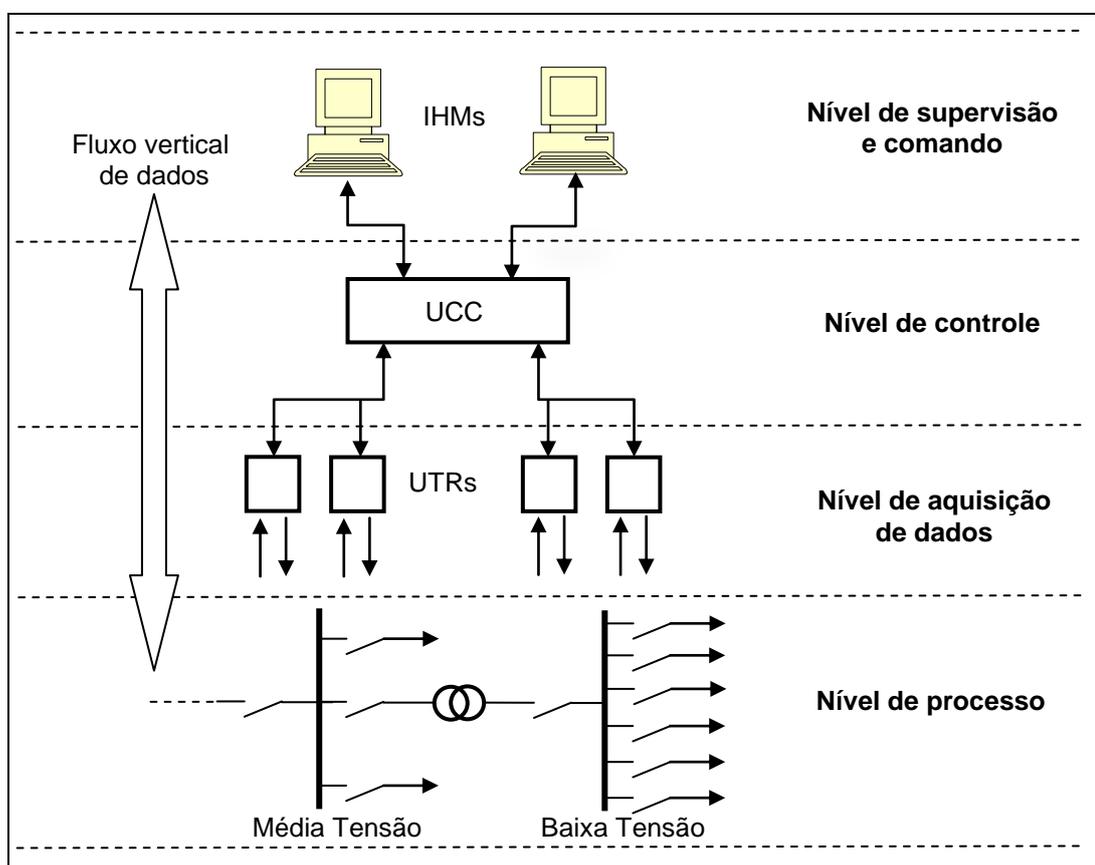


Figura 1: Estrutura de sistema de supervisão e controle.
Fonte: Adaptado de (PAREDES; BORTONI, 2002).

Os sistemas de supervisão e controle recebem um fluxo de informação vindo das Unidades Terminais Remotas (UTRs) e dos relés de proteção, fazendo a aquisição de dados, como ilustrado na Figura 1, e centralizando o processamento na Unidade Central de Controle (UCC). Assim informações são disponibilizadas aos operadores através das IHMs e estes podem monitorar o sistema elétrico,

observando medições de corrente elétrica e potência, estado de equipamentos como disjuntores (aberto/fechado), relés de proteção (atuados/não atuados) e outros alarmes de condições anormais. Uma das funções dos sistemas de supervisão e controle é a sequência de eventos, que cria um registro histórico de todas as mudanças de estado dos disjuntores, atuações de relés e falhas em equipamentos, possibilitando diagnosticar a causa de uma perturbação e tomar ações no sentido de restabelecer as condições normais do sistema elétrico (MEDEIROS et al., 2007).

O trabalho proposto utiliza as informações de sequência de eventos, disponibilizadas pelos sistemas de supervisão e controle. O objetivo geral é criar uma metodologia de implementação para ferramentas computacionais de auxílio à operação na tarefa de analisar as faltas que ocasionam desligamentos permanentes no sistema elétrico, procurando tornar esta tarefa mais rápida e mais confiável.

1.1 MOTIVAÇÃO

Os mesmos sistemas de controle e supervisão que facilitaram o trabalho de operação das instalações de energia elétrica, também criaram um dilema: Como tratar adequadamente todas as informações que são disponibilizadas quase simultaneamente nos centros de operação, durante situações de anormalidades? Quando o sistema elétrico sofre condições adversas, grande quantidade de dados são criados e disponibilizados aos operadores (KEZUNOVIC, 2001).

Poucos benefícios são alcançados, pelo sistema de supervisão e controle, se não for possível a análise das informações disponíveis, em um curto espaço de tempo, de modo a permitir o rápido restabelecimento do sistema.

A dificuldade, dos operadores, na análise do grande volume de informações produzidas em eventos no sistema elétrico, foi a principal motivação para o desenvolvimento deste trabalho.

1.2 DESAFIO

Neste trabalho estuda-se uma metodologia para implementação de um sistema de análise automática de faltas, que causam desligamentos permanentes no sistema elétrico, utilizando-se da sequência de eventos registrada pelos sistemas de supervisão e controle implantados nas concessionárias de energia.

Considerando que é impossível se realizar uma modelagem completa do sistema de potência, para prever de forma analítica todas as ocorrências possíveis, realizou-se uma abordagem através de técnicas de inteligência artificial (CARDOSO JR; ZÜRN; ROLIM, 2004). Várias destas técnicas são atualmente estudadas para estas aplicações. Dentre elas os sistemas especialistas se mostraram como sendo uma técnica adequada para mapear o conhecimento dos operadores (os especialistas no assunto) e assim desenvolver um sistema que os auxilie em um rápido diagnóstico da falta no sistema de potência.

1.3 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é criar um método para implementação de uma ferramenta para auxílio a operação na tarefa de analisar as faltas que ocasionam desligamentos permanentes no sistema elétrico, utilizando como fonte de informações a sequência de eventos.

Não será proposta uma tecnologia específica para implementar este sistema, nem se vislumbra o desenvolvimento de um produto comercial. O que pretende-se é um estudo que comprove a possibilidade da implementação destes sistemas, bem como propor uma metodologia para solução do problema.

Como objetivos específicos são elencados os seguintes pontos:

- Realizar o mapeamento do conhecimento de um especialista no assunto, ou seja, um operador, criando uma base de conhecimento;
- A partir da base de conhecimentos gerada, produzir uma base de regras a serem usadas na análise automática;

- Criar um mecanismo de leitura e interpretação dos dados da sequência de eventos geradas pelos sistemas de supervisão e controle;
- Desenvolver um protótipo para uso *off-line*, ou seja, de forma independente dos sistemas de supervisão e controle, permitindo assim a realização de testes para validação das regras, com uma base de dados de sequências de eventos, obtida através de relatórios de faltas reais ocorridas no sistema elétrico.

Como resultado espera-se facilitar o trabalho de operação do sistema elétrico, também em situações de contingências, auxiliando os operadores no processo de tomada de decisão e reduzindo o tempo necessário para restabelecimento das condições normais.

Do ponto de vista dos operadores, são esperados os seguintes benefícios, com a implantação do sistema:

- Facilitar a compreensão de faltas no sistema elétrico de potência, em tempo real, através da redução de alarmes e sinalizações de proteção e o fornecimento de um diagnóstico;
- Fornecer auxílio à tomada de decisão, reduzindo os níveis de pressão, estresse e ansiedade, característicos em grandes ocorrências no sistema, aumentando a confiança do operador;
- Possibilitar o restabelecimento rápido e seguro das instalações atingidas por uma falta.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Inicia-se, no capítulo 2, com uma breve conceituação sobre sequência de eventos e uma revisão das técnicas utilizadas na análise automática de faltas no Sistema Elétrico de Potência (SEP) levantando assim o estado da arte do assunto. No capítulo 3 é feita a delimitação do problema e descrita a metodologia usada, seguida das generalizações comuns as instalações elétricas e finalizando o capítulo com as etapas da implementação. O capítulo 4, discute os resultados dos testes realizados e as contribuições alcançadas. Por fim são feitas as conclusões e

deixadas sugestões de trabalhos futuros que podem dar continuidade ao que foi desenvolvido.

2. ESTADO DA ARTE

Considerando especificamente a operação dos sistemas elétricos de potência, percebem-se mudanças significativas ocorridas nos últimos anos. A operação era manual e local, sendo executada por operadores diretamente nas instalações, através de painéis de comando e muitas vezes no próprio equipamento. Uma das tarefas dos operadores era o preenchimento de diversas planilhas de dados com medições horárias de energia para cada circuito, número de operações de cada equipamento, medições de fronteira entre empresas, dentre outras. Cada subestação era operada de forma isolada, sendo poucos os recursos de comunicação com outras instalações. Em momentos de anormalidades, como condições climáticas adversas e outras situações, os operadores eram expostos a riscos ao efetuarem comandos nos equipamentos de pátio.

Com a tecnologia da informação e a implantação em grande escala dos sistemas de supervisão e controle, esta realidade mudou. Como estes sistemas são usados para supervisionar, controlar e atuar sobre o sistema elétrico, a operação pode ser feita através de salas de comando computadorizadas, proporcionando mais segurança aos operadores (MEDEIROS et al., 2007). Além disto, quase todas as planilhas de medições foram substituídas por registros automáticos de medidas.

Os registros das proteções atuadas em faltas, que também era feito de forma manual, passou a ser automático, através da supervisão dos estados dos equipamentos no sistema de supervisão e controle. Este faz a transferência para o operador, dos eventos, através da identificação e visualização de alarmes, além de criar um registro histórico (MEDEIROS et al., 2007). Isto deu origem ao que atualmente é chamado de Sequência de Eventos (SOE)¹.

2.1 SEQUÊNCIA DE EVENTOS - SOE

Atualmente os requisitos dos sistemas de supervisão e controle, usados pelos agentes do sistema de transmissão, são especificados e exigidos pelo ONS,

¹ A sigla SOE tem origem no termo em inglês *Sequence Of Events*.

através dos procedimentos de rede, Módulo 2 – Requisitos mínimos para instalações e gerenciamento de indicadores de desempenho. Neste o submódulo 2.7 descreve os requisitos de telessupervisão para a operação.

Primeiramente este manual define alguns termos técnicos. Uma importante definição é feita para o termo **controle**, que no contexto da operação do SEP é empregado para designar a ação de telecomando sobre equipamentos situados nas instalações. O termo **sequenciamento de eventos** é usado para descrever os requisitos necessários para avaliar a situação do SEP, em função da ocorrência de eventos de proteção. Um **ponto** no sistema de supervisão e controle corresponde a uma entrada do sistema de aquisição de dados, usado para sinalização de estado ou medição analógica, ou a uma saída usada para telecomando (OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO, 2010). O capítulo 7 deste submódulo refere-se aos requisitos para supervisão e controle de equipamentos pertencentes a rede de operação do Sistema Interligado Nacional (SIN) e o capítulo 8 define os requisitos para o sequenciamento de eventos.

O conceito de uma sequência de eventos é que ela deve conter os registros, de forma sequencial e cronológica, de todas as mudanças de estado de todos os pontos que possuem supervisão. Para esclarecer os tipos de pontos que são supervisionados em uma subestação, está transcrito abaixo a lista de informações requeridas para um circuito de linha de transmissão:

8.2.1.4 Linhas de transmissão:

(a) Grupo "A":

- (1) disparo por sobretensão;
- (2) atuação da lógica de bloqueio por oscilação de potência;
- (3) disparo da proteção para perda de sincronismo;
- (4) atuação do relé de bloqueio de recepção permanente de transferência de disparo;
- (5) disparo do relé de bloqueio de linha subterrânea.

(b) Grupo "B":

- (1) disparo da proteção principal de fase;
- (2) disparo da proteção alternada de fase;
- (3) disparo da proteção principal de neutro;
- (4) disparo da proteção alternada de neutro;
- (5) transmissão de sinal de desbloqueio/bloqueio ou sinal permissivo da teleproteção;
- (6) transmissão de sinal de transferência de disparo da teleproteção;
- (7) recepção de sinal de desbloqueio/bloqueio ou sinal permissivo da teleproteção;
- (8) disparo por recepção de sinal de transferência de disparo da teleproteção;
- (9) atuação da lógica de bloqueio por perda de potencial;
- (10) disparo da 2ª zona da proteção de distância;
- (11) disparo da 3ª zona da proteção de distância;

- (12) disparo da 4ª zona da proteção de distancia;
- (13) disparo da proteção de sobrecorrente direcional de neutro temporizada;
- (14) disparo da proteção de sobrecorrente direcional de neutro instantânea.

(c) Grupo "C":

- (1) partida da proteção principal de fase (por fase), nos casos em que o disparo da proteção de fase não indique a(s) fase(s) defeituosas;
- (2) partida da proteção alternada de fase (por fase), nos casos em que o disparo da proteção de fase não indique a(s) fase(s) defeituosas;
- (3) partida da proteção principal de neutro (por fase), nos casos em que o disparo da proteção não indique a fase defeituosa;
- (4) partida da proteção alternada de neutro (por fase), nos casos em que o disparo da proteção não indique a fase defeituosa;
- (5) partida do religamento automático.

(OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO, 2010)

Apesar de não existir uma padronização de como devem ser apresentadas as informações dos eventos, cada evento registrado deve conter alguns campos mínimos, para possibilitar sua compreensão:

- Hora, com precisão de milésimo de segundo;
- Sigla do circuito, para identificar a qual circuito pertence o ponto em questão;
- Descrição do ponto de supervisão;
- Estado atual do ponto ou para o qual mudou.

Quanto a hora, os sistemas de supervisão e controle dos agentes devem "ter seus relógios internos ajustados com exatidão melhor ou igual a 1 (um) milissegundo, com sincronismo por GPS" (OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO, 2010). O sincronismo por GPS permite a comparação das sequências de eventos, registradas em instalações distintas, pertencentes a um ou mais agentes² e em locais diferentes. Desta forma é possível, em análises posteriores aos eventos, determinar onde ocorreu o início de um desligamento e como se propagou.

A figura 2 exemplifica uma sequência de eventos, na qual pode-se observar a existência dos campos contendo hora, identificação do circuito, descrição do ponto e condição atual.

Cada linha da sequência de eventos corresponde ao registro de uma mudança de estado em um ponto de supervisão, apresentado de forma resumida. A interpretação da primeira linha de registro da Figura 2 indica que as 12 horas, 6 minutos, 33 segundos e 248 milésimos de segundos do dia 25/02/2008 ocorreu falha

² Agentes são as empresas que atuam no SIN administrando instalações de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica (SERRATO, 2006).

de comunicação do sistema de supervisão e controle com o relé de sobrecorrente do lado de alta tensão (AT) do transformador 1 (TR-01).

DataHora	Reconhecido	Condição Ativa	Mensagem
25/02/2008 12:06:33,248	Não	Sim	TR-01 - Falha de comunicação com relé sobrecorrente AT RL1
25/02/2008 12:06:33,238	Não	Sim	Bay de entrada - Falha de comunicação com relé RL1 - Painel
25/02/2008 12:06:33,228	Não	Sim	AL05 - Falha de comunicação com relé RL1 - Painel PN3
25/02/2008 12:06:33,218	Não	Sim	AL07 - Falha de comunicação com relé RL3 - Painel PN3
25/02/2008 12:06:33,218	Não	Sim	TR-01 - Falha de comunicação com relé regulador REG D RL3
25/02/2008 12:06:28,281	Não	Não	SAUX - Normalizada comunicação com relé 2411
25/02/2008 12:03:28,613	Não	Sim	AL06 - Atuou mola descarregada
25/02/2008 12:03:28,613	Não	Sim	AL08 - Atuou mola descarregada
25/02/2008 12:03:28,613	Não	Sim	AL07 - Atuou baixo nível de CC (2º nível 100 Vcc)
25/02/2008 12:03:28,613	Não	Sim	RL1 PN1 - Atuou baixo nível de CC (2º nível 110 Vcc)
25/02/2008 12:03:28,613	Não	Sim	AL05 - Atuou baixo nível de CC (2º nível 100 Vcc)
25/02/2008 12:03:28,613	Não	Sim	AL06 - Atuou baixo nível de CC (2º nível 100 Vcc)
25/02/2008 12:03:28,603	Não	Sim	AL07 - Atuou mola descarregada
25/02/2008 12:03:28,603	Não	Sim	AL08 - Bloqueou religamento
25/02/2008 12:03:28,603	Não	Sim	RL1 PN2 - Atuou baixo nível de CC (2º nível 110 Vcc)

Figura 2: Exemplo de sequência de eventos.

Fonte: (KIMURA et al., 2008).

Para os operadores, cada mudança de estado de um ponto de supervisão, produz um alarme, sonoro e visual, no sistema de supervisão e controle. Em ocorrência de distúrbios, que provoquem desligamentos permanentes, a prioridade é restaurar, o mais breve possível, a parte do SEP atingido (CARDOSO JR; ZÜRN; ROLIM, 2004). Para isto, porém, o operador deve interagir com o sistema, seguindo alguns passos:

1. Ler a descrição do ponto em alarme;
2. Interpretar o seu significado;
3. Efetuar o comando de reconhecimento do alarme, silenciando o alarme sonoro e visual. Desta forma o operador assume que esta ciente do significado do alarme e de suas consequências;
4. Analisar o conjunto de alarmes, e o significado que todos juntos representam;
5. Tomar uma decisão, baseada em procedimentos operacionais previamente determinados, na sua experiência operacional e no seu conhecimento das instalações, definindo qual ação deve ser tomada naquela situação;
6. Agir, conforme a decisão tomada, para promover a recomposição do sistema e, o mais breve possível, seu retorno a normalidade.

A recomposição após uma perturbação é uma das atividades de operação em tempo real, e visa restabelecer com rapidez e segurança a condição normal de operação do SEP, com o atendimento pleno das cargas. O submódulo 10.11 dos

procedimentos de rede do ONS define as responsabilidades dos agentes, na recomposição das instalações da rede de operação após perturbações.

- (a) Preparar as instalações para o recebimento de tensão ou envio de tensão, efetuando manobras de acordo com as instruções específicas.
 - (b) Supervisionar, comandar e executar as ações de recomposição fluente de suas instalações na rede de operação, bem como as ações de restabelecimento das cargas na área sob sua responsabilidade, conforme instruções de operação do ONS.
 - (c) Supervisionar, comandar e executar, na fase coordenada, as ações de recomposição determinadas pelo ONS.
 - (d) Somente fazer uso de tensão que atenda às condições de energização e que seja proveniente dos circuitos estabelecidos nos sentidos e sequência de energização determinados nas instruções de operação de suas instalações, com exceção dos casos acordados em tempo real pelos agentes da operação envolvidos e autorizados pelo centro de operação do ONS, durante a fase coordenada de recomposição.
 - (e) Restabelecer a carga prioritária, conforme definido pelo agente em cada fase de recomposição, até o limite preestabelecido nas instruções de operação de suas instalações ou pelos centros de operação do ONS.
 - (f) Fazer contato com o centro de operação do ONS com o qual se relacionam quando detectar alguma anormalidade no processo de recomposição fluente, informá-lo do término da anormalidade e aguardar as ações de recomposição para a fase coordenada e/ou liberação de carga adicional.
- (OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO, 2010)

A grande dificuldade operacional quando de ocorrência de perturbações é a interpretação, em curto espaço de tempo, de todos os alarmes gerados. Se a decisão correta for tomada, obtêm-se sucesso na recomposição, reduzindo o tempo de interrupção e restaurando a confiabilidade do SEP. Se a decisão errada for tomada, a situação tende a se agravar e propagar pelo SEP ao religar equipamentos defeituosos e ainda aumentar os danos aos equipamentos. (CARDOSO JR; ZÜRN; ROLIM, 2004).

Em grandes perturbações os operadores podem ser prejudicados pelo número enorme de alarmes gerados pelos acontecimentos no SEP. Uma falta pode provocar centenas e até milhares de alarmes e eventos. Um levantamento realizado pela concessionária de energia, Hydro Quebec³, obteve algumas estimativas do número de alarmes que podem ser provocadas por diversos tipos de eventos (KEZUNOVIC; GUAN, 2009):

- Até 150 alarmes para uma falta em um transformador;

³ Hydro Quebec: Concessionária estatal de geração, transmissão e distribuição de energia, pertencente ao governo da província de Québec, no Canadá.

- Até 2000 alarmes para uma falta em uma subestação de geração. Sendo os primeiros 300 alarmes gerados durante os primeiros cinco segundos;
- Até 20 alarmes por segundos durante uma tempestade;
- Até 15.000 alarmes para cada centro regional de operação durante os primeiros cinco segundos de um colapso completo do sistema.

Este grande volume de dados torna a análise manual quase impraticável, demorada e susceptível a erros (LENZ; ROLIM, 2010). É nesse contexto que surge a clara necessidade de uma ferramenta automática para prover auxílio na análise de faltas.

2.2 METODOLOGIAS EMPREGADAS NA ANALISE AUTOMÁTICA

A análise automática, de faltas e perturbações, é a habilidade de computadores em correlacionarem os dados disponíveis, gerando informações que sejam mais úteis do que os dados brutos (RODRIGUES et al., 2010). Para o desenvolvimento de uma ferramenta capaz de realizar a análise automática é necessário delimitar a sua atuação. Desta forma surgem duas formas distintas de abordar o problema e que interferem diretamente no método de solução:

- Análise para auxílio a operação, em tempo real ou pós-operação;
- Análise em nível de subestação ou em nível de centro de operação.

Apesar das diferentes abordagens, todas as técnicas baseiam-se no uso de ferramentas de inteligência artificial. Isto é consequência da alta complexidade do SEP, que inviabiliza a criação de um modelo analítico capaz de representá-lo em todas as suas situações, principalmente nas de anormalidades. (CARDOSO JR; ZÜRN; ROLIM, 2004).

Inteligência artificial, de um modo geral, consiste numa forma de programar computadores baseada em como as pessoas pensam quando precisam tomar decisões e resolver problemas. (LEVINE; DRANG; EDELSON, 1988).

Como principais ferramentas de inteligência artificial pode-se citar: redes neurais artificiais (RNA), sistemas especialistas (SEs), algoritmos genéticos, redes de Petri e lógica *fuzzi* ou lógica difusa. "A escolha de qual ferramenta utilizar

depende da necessidade e das especificações de cada sistema de diagnóstico de falta, como velocidade de resposta, precisão, versatilidade quanto a topologia do sistema, entre outros aspectos." (MEDEIROS et al., 2007).

Publicações recentes mostram estudos para desenvolver ferramentas de análise automática de faltas com varias abordagens. Moreto (2010) mostra uma aplicação para análise de oscilografias⁴ em sistemas elétricos de potência com foco na pós-operação de sistemas de geração. Sousa (2010) relata a experiência da Companhia energética de Minas Gerais (Cemig) no desenvolvimento de um sistema de localização automática de faltas em linhas de transmissão. Medeiros (2007) traz uma abordagem para diagnóstico de faltas no sistema elétrico baseada em redes de Petri coloridas. Rodrigues (2010) descreve as novas tendências para análise automática de faltas e distúrbios em sistemas de potência.

O uso de SOE também tem sido foco de estudos visando desenvolver ferramentas para auxílio a operação em tempo real na tarefa de análise de alarmes. Batista (2005) apresentou um sistema inteligente para tratamento de alarmes e diagnóstico de faltas em redes elétricas. Mais recentemente, Antunes (2010) apresentou o "Sistema de Diagnóstico de Perturbações em Tempo Real", que está em testes no centro de operação do sistema (COS) de transmissão da Cemig, capaz de auxiliar o operador no entendimento de perturbações, em tempo real.

2.3 DELIMITAÇÃO DO PROBLEMA E SOLUÇÃO PROPOSTA

Como visto, nos tópicos anteriores, a análise de faltas no SEP pode ser abordada com diversos enfoques e objetivos. Neste trabalho estuda-se o desenvolvimento de uma ferramenta para análise automática de faltas no SEP baseada nos registros de SOE dos sistemas de supervisão e controle. Delimitou-se o estudo para uma abordagem do problema em nível de subestação, voltado ao fornecimento de apoio e suporte ao operador na tomada de decisões, em tempo real.

⁴ Oscilografia: registro das oscilações de grandezas elétricas do sistema elétrico de potência, como tensões e correntes. (MORETO; ROLIM, 2010).

Propõem-se criar uma base de conhecimento que possibilite a interpretação das SOEs. Regras formam a base de conhecimento para viabilizar o desenvolvimento de sistemas computacionais que servem como ferramentas de auxílio a operação, em tempo real.

O sistema computacional, aqui idealizado, pode realizar uma filtragem de alarmes e sinalizações, de menor prioridade da SOE, para posterior comparação com a base de regras, buscando responder algumas das perguntas feitas pelos operadores no momento da ocorrência de faltas:

- Quais foram as primeiras sinalizações de proteção indicadas?
- O desligamento de um equipamento ocorreu por atuação de proteção ou causado por evento externo (falha de outro equipamento)?
- Qual o conjunto das proteções, de um equipamento, que atuaram (considerando mensagens de SOE)?
- Em quais equipamentos houve tentativa de religamento automático (satisfatório ou não), e/ou atuação de proteção impeditiva?

As respostas destas perguntas são de fundamental importância no processo de tomada de decisão e um sistema de auxílio a operação deverá ser capaz de respondê-las ou, pelo menos, oferecer dados para o operador chegar a uma resposta de forma mais rápida.

A ferramenta, se implantada por um agente do SIN, auxiliará o operador fazendo a interpretação dos alarmes após eventos com desligamentos definitivos, indicando a causa mais provável dos desligamentos e informando quais os equipamentos que devem ser mantidos fora de operação até sua inspeção por equipes de manutenção.

3. DESENVOLVIMENTO

Este capítulo trata de forma mais específica as etapas do desenvolvimento do trabalho. Inicia-se pela descrição da metodologia utilizada, seguida das generalizações que se fizeram necessárias para tornar o sistema adaptável a qualquer instalação real. Por último são detalhados os módulos desenvolvidos como parte da implementação do trabalho e o conjunto de regras criadas para formar a base de conhecimento.

3.1 METODOLOGIA

O problema sob estudo neste trabalho (análise automática de faltas no SEP), possui características que o torna adequado para ser abordado por técnicas de inteligência artificial. A principal delas é o fato de não ser possível uma solução analítica, pois não é viável a criação de um modelo matemático capaz de prever, com exatidão, todas as possíveis mudanças de configuração e atuações de proteção durante uma falta no SEP.

Dentre os métodos de inteligência artificial, os SEs mostram-se adequados para abordar o problema, pois visam emular o comportamento de especialistas humanos na análise, comparando os dados com regras (KEZUNOVIC; GUAN, 2009). Todo o conhecimento em um SE é fornecido por pessoas que são especialistas naquele domínio (LEVINE; DRANG; EDELSON, 1988). Sendo que no problema abordado nesta monografia, tais especialistas são os operadores das concessionárias de energia, a partir dos quais são obtidas as informações para a criação da base de conhecimento sobre as faltas no SEP.

Assim sendo a técnica proposta é o desenvolvimento de um conjunto de regras de interpretação automática da SOE, com programação computacional baseada em SEs. A estrutura de um SE é apresentada na Figura 3 sob a forma de diagrama de blocos.

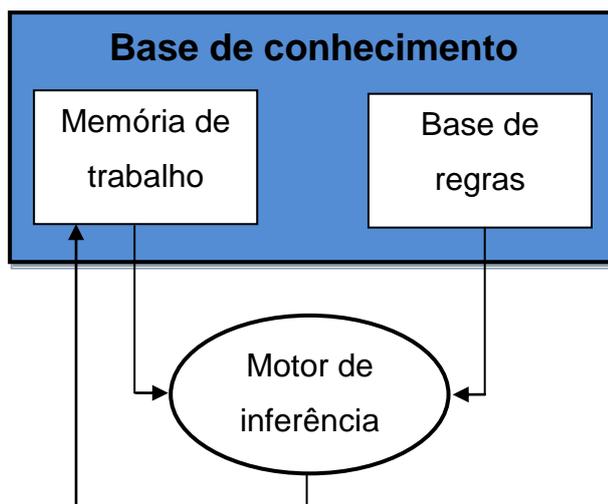


Figura 3: Partes que compõem um SE.
Fonte: Adaptado de (CARDOSO JR; ZÜRN; ROLIM, 2004)

A base de conhecimento de um SE é composta por fatos e regras. (LEVINE; DRANG; EDELSON, 1988). Os fatos formam a memória de trabalho, a qual para o problema em questão, é composta pelo relatório de SOE que deverá ser fornecido pelo usuário.

A base de regras é formada a partir da aquisição do conhecimento de um especialista humano, através de entrevista com o mesmo (CARDOSO JR; ZÜRN; ROLIM, 2004). Neste trabalho o próprio desenvolvedor desempenha o papel do especialista, pois o mesmo atua profissionalmente como operador em um agente de transmissão de energia elétrica, conectado ao SIN.

O motor ou mecanismo de inferência é a parte do SE responsável por avaliar quais regras são executadas com base nas informações contidas nos fatos da memória de trabalho. A seguir são apresentados alguns exemplos de regras avaliadas pelo mecanismo de inferência:

- SE (proteção de distância 21Z1 da LT1 atuou) E (disjuntor da LT1 abriu) ENTÃO (falta na LT1);
- SE (atuou proteção 87B diferencial de barra A) E (todos os disjuntores da barra A abriram) ENTÃO (ocorreu uma falta na barra A). (CARDOSO JR; ZÜRN; ROLIM, 2004).

Para testar e validar as regras criadas na base de conhecimento é utilizado o ambiente de desenvolvimento de sistemas especialistas *C Language Integrated Production System* (CLIPS). Este foi desenvolvido usando a linguagem de programação C no *Johnson Space Center* da Agência Espacial Americana (NASA) e foi tornada de uso público (ELISEI; OSTELLINO, 2003).

O CLIPS é um ambiente de programação multiparadigma que suporta a programação procedimental (tradicional), programação orientada a objetos e baseada em regras. O objetivo da NASA com a criação do CLIPS foi gerar soluções com portabilidade e fácil integração com outros sistemas. Os sistemas desenvolvidos no CLIPS podem ser embutidos em outros programas, através do uso de Interface de Programação de Aplicativos (APIs), para qualquer aplicação que seja baseada em regras. (ELISEI; OSTELLINO, 2003). Desta forma se torna adequado para este trabalho, pois, portabilidade é uma característica desejada para que o sistema especialista possa ser integrado aos sistemas existentes nos ambientes de operação dos agentes do SIN.

3.2 ASPECTOS GERAIS DO SEP

As subestações de energia elétrica possuem características individuais que as tornam únicas no SEP ao qual pertencem. Dependendo do local onde estão instaladas e das características de geração e consumo da região, podem possuir diferente quantidade de elementos de interligação (linhas de transmissão), elementos de conexão (barramentos), elementos de compensação (bancos de capacitores e reatores) ou elementos de transformação.

Porém mesmo com estes aspectos individuais é possível encontrar aspectos gerais que são comuns a todas as subestações. Como exemplo pode-se citar os dispositivos de proteção usados em transformadores e linhas de transmissão.

Nos tópicos seguintes são definidos, dentre as características individuais, as empregadas no desenvolvimento do sistema, bem como as características gerais comuns aos elementos do SEP.

3.2.1 Subestação protótipo

O SIN do Brasil possui como característica marcante a sua extensão territorial, com grandes usinas instaladas distantes dos centros consumidores. Para reduzir as perdas no processo de transmissão de energia torna-se adequado a elevação da tensão nas subestações de conexão das usinas para posterior redução nas subestações próximas dos centros consumidores. Neste caminho também se encontram subestações de conexão da malha de transmissão, chamadas de estações chaves (PAREDES; BORTONI, 2002).

Os nós do SEP são representados fisicamente por barramentos de conexão. Diferentes topologias são usadas nos barramentos, de acordo com o nível de tensão em que operam e o grau de importância do mesmo para o SIN. Na tensão de 230 kV são comumente encontradas as topologias barra principal e de transferência ou barra dupla. Já nas tensões mais altas, acima de 500 kV, é típico o uso da topologia disjuntor e meio por oferecer maiores possibilidades de manobras e maior confiabilidade, porém com maior custo (KINDERMANN, 2008).

Como protótipo para o sistema foi utilizada a topologia barra principal e de transferência por representar uma típica subestação em 230 kV. Neste arranjo cada elemento conectado ao barramento principal possui um DJ específico para sua proteção. Em condição normal de operação a subestação opera pela barra principal com todos os DJ associados a elementos fechados. Na eventual ocorrência de defeito na barra principal todos os circuitos são desligados e permanecem indisponíveis até que o defeito seja sanado. O barramento principal é conectado ao barramento de transferência através de um DJ que pode ser usado para transferir qualquer circuito quando necessário, porém, somente um circuito por vez pode utilizar o DJ e a barra de transferência. O DJ transferência opera normalmente aberto e a barra de transferência só é energizada quando necessário. A transferência de circuito é executada sem que seja necessário desliga-lo e nesta condição o esquema de proteção do elemento transferido passa a atuar sobre o DJ transferência. (KINDERMANN, 2008).

Para o protótipo considerou-se a existências de duas linhas de transmissão, dois transformadores e um banco de capacitor em derivação, representando assim os elementos mais comuns do SEP. A Figura 4 mostra o

diagrama unifilar da subestação protótipo para a qual se desenvolveu o sistema. Não importam aqui as características de potência dos elementos, já que isto só altera as características construtivas de isolamento e dissipação e não a forma de conexão elétrica.

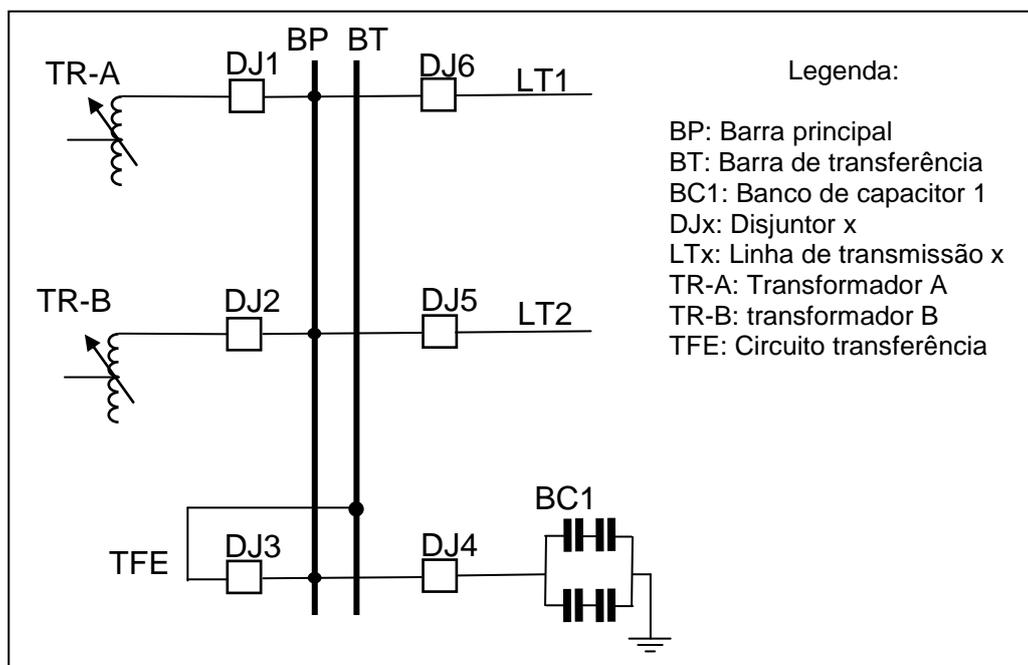


Figura 4: Diagrama unifilar da subestação protótipo usada no sistema.
Fonte: Autoria própria.

3.2.2 Elementos e suas proteções típicas

As subestações são instalações que de maneira geral, tem a finalidade de interligar sistemas, transformar tensões e entregar energia elétrica aos consumidores, simultaneamente com qualidade, confiabilidade, segurança e economia. As linhas de transmissão tem como finalidade, o transporte da energia elétrica dos parques geradores até os centros consumidores. Por mais que sejam submetidas a manutenções com qualidade e periodicidade adequadas, as linhas de transmissão e subestações, com seus elementos sempre estão sujeitas a anormalidades, dentre as quais podemos citar: curto-circuito, subtensões, sobretensões, sobrecargas, oscilações e problemas de isolamento. As causas mais frequentes de anormalidades, também conhecidas por "faltas", em subestações e

linhas de transmissão são: condições climáticas (descargas atmosférica, chuvas, ventos fortes, etc.), animais, atos de vandalismo, próprias do sistema (equipamentos e falha humana), entre outras (KINDERMANN, 2007).

O curto-circuito é a anormalidade que tem maior efeito negativo sobre o desempenho do SEP, pois pode causar interrupções, danos a equipamentos e acidentes pessoais e por isso deve ser rapidamente eliminado. Para isto, empregam-se sistemas de proteção capazes de detectar as anormalidades e atuar de forma a desligar a menor parte do sistema a fim de isolar o defeito e manter o restante em operação. Os sistemas de proteção são compostos por dispositivos sensores, dispositivos de controle e decisão e dispositivos atuadores. Os sensores são os transformadores de corrente e de potencial que medem a corrente e tensão do sistema, respectivamente, fornecendo informações para os dispositivos de controle. Estes, conhecidos como reles de proteção, fazem a comparação com valores de referência e de acordo com seus ajustes enviam sinal aos disjuntores, que são os atuadores, a fim de eliminar a falta.

Os dispositivos de proteção são projetados de acordo com as características do elemento que irão proteger. Desta forma cada elemento do SEP possui dispositivos específicos e que são tipicamente aplicáveis. O Quadro 1 mostra os dispositivos típicos empregados para os elementos presentes em subestações.

Elemento	Proteções típicas	
	Nomenclatura	Função de proteção
Linha de transmissão com proteção digital	21Z1	Proteção de distância 1° zona para defeito entre fases.
	21Z2	Proteção de distância 2° zona para defeito entre fases.
	67Ni	Sobrecorrente direcional de neutro instantânea.
	67Nt	Sobrecorrente direcional de neutro temporizada.
	79	Rele de religamento automático.
	50BF	Deteção de corrente para falha de abertura de disjuntor.

Quadro 1: Proteções típicas por elemento.

(continua)

Fonte: Adaptado de (MOROZONI JR., 2003).

Elemento	Proteções típicas	
	Nomenclatura	Função de proteção
Linha de transmissão com proteção eletromecânica	21P	Proteção de distância para defeito entre fases, principal.
	67NP	Sobrecorrente direcional de neutro, principal.
	1 21	Proteção de distância 1º zona para defeito entre fases.
	2 21	Proteção de distância 2º zona para defeito entre fases.
	67Ni	Sobrecorrente direcional de neutro instantânea.
	67Nt	Sobrecorrente direcional de neutro temporizada.
	95	Detecção de corrente para falha de abertura de disjuntor.
	79	Rele de religamento automático.
Transformadores	51F	Sobrecorrente de fase temporizado.
	51N	Sobrecorrente de neutro temporizado.
	63C	Fluxo de óleo do tanque da chave de comutação sob carga.
	63T	Fluxo de óleo ou formação de gás do tanque principal do transformador (relé buchhols).
	87T	Rele diferencial da área do transformador.
	86T	Chave de bloqueio do transformador.
	50BF	Detecção de corrente para falha de abertura de disjuntor.
Banco de capacitor	51F	Sobrecorrente de fase temporizado.
	51N	Sobrecorrente de neutro temporizado.
	59	Sobretensão
	60	Desequilíbrio de corrente para defeito interno em elementos capacitivos.
	50BF	Detecção de corrente para falha de abertura de disjuntor.
Barra simples ou dupla	87B	Rele diferencial de barra.
	86B	Chave de bloqueio da barra.

Quadro 1: Proteções típicas por elemento.

(conclusão)

Fonte: Adaptado de (MOROZONI JR., 2003).

A Figura 5 mostra o diagrama unifilar da subestação usada no sistema com a representação dos dispositivos de proteção de cada elemento e suas atuações nos disjuntores.

Pode-se identificar na Figura 5 os três dispositivos principais que compõem um sistema de proteção. Para cada elemento tem-se um Transformador de Corrente (TC) como dispositivo sensor, o qual reproduz uma amostra da corrente do elemento (LT, TR ou BC) e alimenta os dispositivos de proteção. Estes quando identificam condições anormais pré-ajustadas atuam sobre o DJ promovendo o desligamento deste elemento.

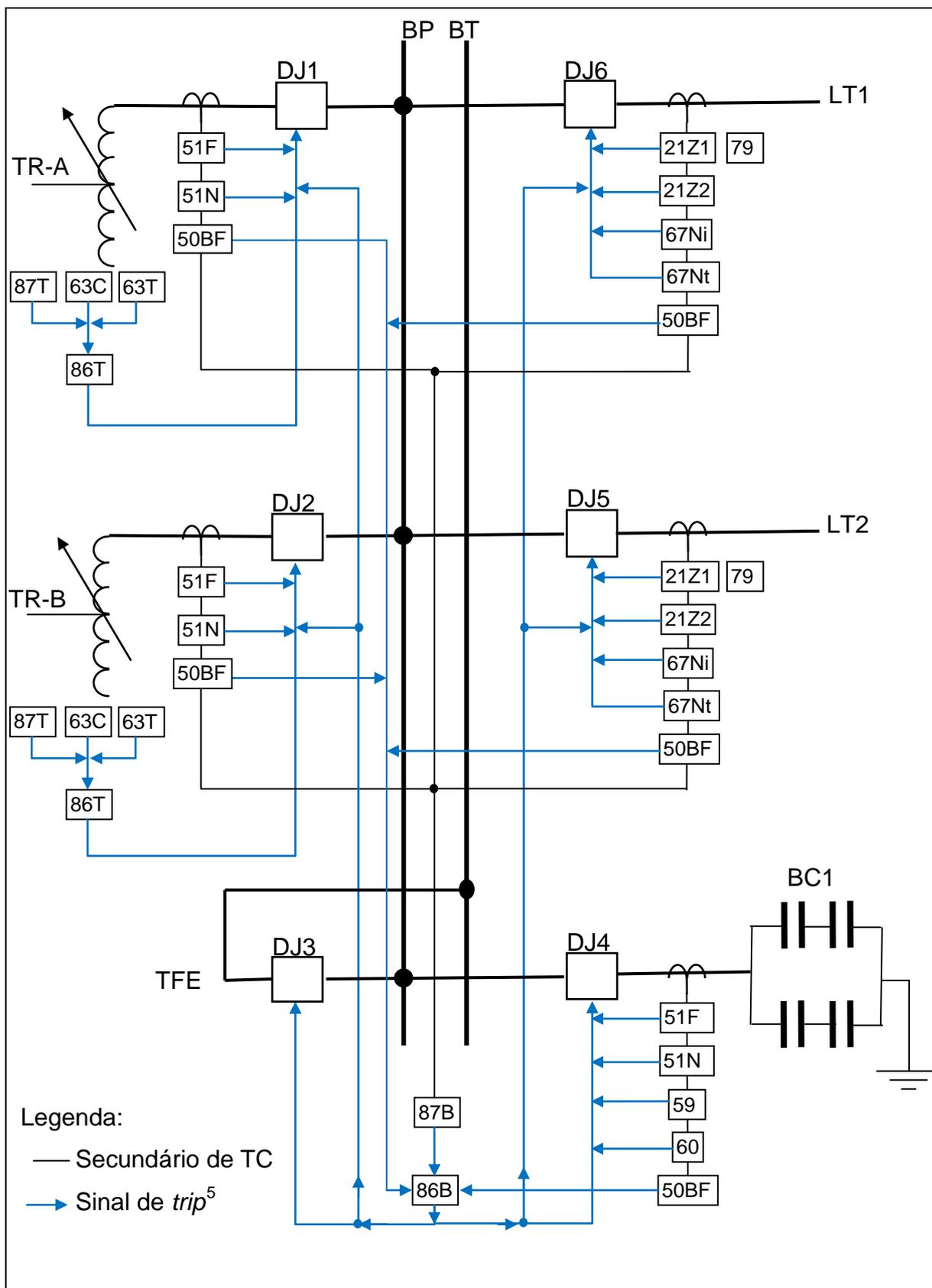


Figura 5: Representação das proteções dos elementos da subestação protótipo.
Fonte: Autoria própria.

⁵ Sinal de *trip* é o sinal enviado por um dispositivo de proteção para a abertura de um disjuntor quando da detecção de uma falta.

Para exemplificar o funcionamento do sistema de proteção supõem-se uma ocorrência de falta do tipo curto-circuito monofásico a terra no início da LT1 da subestação protótipo. Nesta situação teremos a seguinte lógica de atuação:

- O TC irá reproduzir uma amostra da corrente de curto-circuito e alimentar os relés de proteção;
- O relé 67Ni, relé de sobrecorrente direcional de neutro instantâneo, irá detectar a falta e atuar enviando o sinal de *trip*, representado pela linha em azul na Figura 5;
- O DJ6 ao receber o sinal de *trip* irá abrir, interrompendo a passagem da corrente de curto-circuito e desligando a LT1, eliminando a falta do SEP;
- Caso ocorra falha na abertura do DJ6 o relé 50BF irá atuar enviando sinal de *trip* para a chave de bloqueio da barra 86B;
- Ao receber o sinal de *trip* a chave de bloqueio da barra 86B irá replicar este sinal para todos os DJs ligados a barra promovendo assim um desligamento geral da barra para eliminar a falta na LT1. Esta é uma lógica de atuação de proteção de retaguarda para falta na LT1 com falha do DJ6.

Da mesma forma, a lógica de atuação da proteção é semelhante para os demais elementos da subestação protótipo quando da ocorrência de falta e atuação de proteção.

3.3 IMPLEMENTAÇÃO DA BASE DE CONHECIMENTO

A base de conhecimento do SE é, como mostrado na Figura 3, formada por dois módulos. Um deles é a memória de trabalho e o outro a base de regras. A estrutura proposta para o sistema de análise de faltas através de SOE é mostrada na Figura 6.

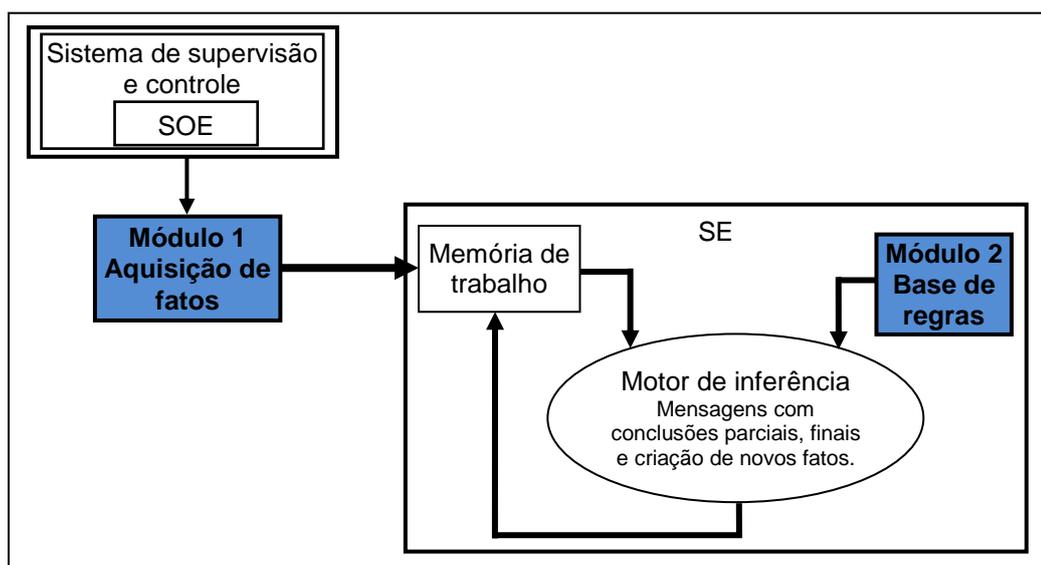


Figura 6: Diagrama em blocos do sistema proposto.
Fonte: Autoria própria.

Os subtópicos seguintes detalham o desenvolvimento dos módulos 1 e 2.

3.3.1 Módulo 1: aquisição de fatos do relatório de SOE

Este módulo é o responsável por fazer a extração dos fatos relevantes para a análise de faltas a partir do relatório de SOE emitido pelos sistemas de supervisão e controle. Essencialmente sua função é fazer a tradução e seleção das informações do sistema de supervisão e controle para o SE, ignorando as informações excedentes.

A extração dos fatos relevantes da SOE consiste de um processo de filtragem dos eventos, reduzindo assim o número de informações ao mínimo necessário para se fazer a análise da falta. Isto é importante porque o relatório de SOE inclui registros que são necessários a outros estudos, principalmente os de pós-operação como comutação de *taps* de transformadores e sobrecarga em equipamentos. O relatório de SOE também contém registros irrelevantes quando da análise de faltas, como, por exemplo, ocorrência de subtensão em todos os circuitos adjacentes a aquele onde houve a falta. Esses registros em excesso dificultam a análise manual e a sua filtragem por si só já é uma melhoria para a operação em tempo real.

A classificação de quais fatos são relevantes ou não é baseada na descrição do subtópico 3.2.2 através do Quadro 1 e Figura 5, sendo considerados apenas os registros que informam o envio de sinal de *trip*, devido a atuação de proteção, para a abertura de DJs e também o registro da mudança de estado dos DJs.

O formato do relatório de SOE utilizado como base para a extração dos fatos pode variar de acordo com as características do sistema de supervisão e controle. O Quadro 2 mostra o formato usado para o desenvolvimento do protótipo e na sequência detalham-se os campos de informações contidas na SOE e como foram extraídas.

Estampa de tempo	Subestação		Circuito	Descrição	Estado
>11:43:55:714	PRT	E	TR-B	COM TAPE AUMENTA	ATUADO
>11:43:56:763	PRT	E	TR-B	COM TAPE AUMENTA	DESATUADO
>12:53:54:470	PRT	E	TR-B	FALTA CA VF	ALARME
>12:53:54:714	PRT	E	TR-B	FALTA CA VF	NORMAL
>12:53:54:435	PRT	E	LT1	230 RELE 21Z1	DESLIGAMENTO
>12:53:54:436	PRT	E	LT1	230 RELE 94	DESLIGAMENTO
>12:53:54:462	PRT	E	LT1	230 DJ 52-06	ABERTO *****
>12:53:54:503	PRT	E	LT1	230 RELE 94RT	DESLIGAMENTO
>12:53:54:536	PRT	E	LT1	230 RELE 94	NORMAL
>12:53:54:538	PRT	E	LT1	230 RELE 21Z1	NORMAL
>12:53:54:578	PRT	E	LT1	230 RELE 94RT	NORMAL
>12:53:54:443	PRT	E	TR-A	230 FALTA TP	ALARME
>12:53:54:519	PRT	E	TR-A	230 FALTA TP	NORMAL
>12:53:56:599	PRT	E	LT1	230 RELE 79	RELIGAMENTO
>12:53:56:649	PRT	E	LT1	230 DJ 52-06	FECHADO *****
>12:53:56:816	PRT	E	LT1	230 RELE 79	NORMAL
12:54:43:095	PRT	E	LT1	230 DJ 52-06	RECONHECIDO
12:54:43:095	PRT	E	LT1	230 RELE 21Z1	RECONHECIDO
12:54:43:095	PRT	E	LT1	230 RELE 94	RECONHECIDO
12:54:43:095	PRT	E	LT1	230 RELE 94RT	RECONHECIDO
12:54:43:095	PRT	E	LT1	230 RELE 79	RECONHECIDO
12:54:43:095	PRT	E	TR-A	230 FALTA TP	RECONHECIDO
12:54:43:095	PRT	E	TR-B	FALTA CA VF	RECONHECIDO
>13:12:30:968	PRT	E	TR-B	COM TRANS TAPE	ATUADO
>13:12:31:415	PRT	E	TR-A	COM TRANS TAPE	ATUADO
>13:12:34:996	PRT	E	TR-A	COM TRANS TAPE	DESATUADO

Quadro 2: Formato do relatório do protótipo com campos da SOE.

Fonte: Dados fictícios, autoria própria.

Verifica-se no Quadro 2 a existência de campos bem definidos no relatório de SOE que facilitam a extração de fatos. Para exemplificar, o Quadro 3 mostra os fatos extraídos dos registros com destaque em vermelho e verde no Quadro 2, respectivamente.

Fato 1	21Z1 LT1 DESLIGAMENTO
Fato 2	DJ6 LT1 ABERTO

Quadro 3: Exemplo de fatos extraídos do relatório de SOE.

Fonte: Autoria própria.

Os fatos extraídos pelo módulo 1 formam a memória de trabalho inicial do SE, o qual durante o processo de inferência pode adicionar novos fatos. A interpretação dos fatos mostrados no Quadro 3 é feita e explicada no subtópico 3.3.2, a seguir, onde estão detalhadas as regras da base de conhecimento.

O módulo 1 foi desenvolvido no programa MATLAB[®] ⁶, através da implementação de uma rotina que faz a leitura dos dados do arquivo de SOE no formato texto, arquivo SOE.txt, e traduz para um arquivo de saída, também no formato texto, arquivo fatos.bat, contendo os fatos extraídos. O arquivo fatos.bat é usado como entrada de dados para o SE formar a memória de trabalho inicial.

3.3.2 Módulo 2: base de regras para interpretação dos fatos

Este módulo contém a base de regras que faz parte da base de conhecimento do SE. As regras foram desenvolvidas a partir do conhecimento do autor, na condição de especialista, como citado no tópico 3.1.

Foram desenvolvidas regras para interpretação das atuações de proteções da subestação protótipo, mostrada na Figura 5. Portanto estas regras não devem ser aplicadas a subestações com diferentes topologias de barramentos visto que a filosofia do sistema de proteção pode ser outra. Nestes casos é necessário o desenvolvimento de novas regras, ampliando assim a base de conhecimento. Isto exemplifica como o SE poderá ser melhorado e ampliado apenas com a criação de

⁶ MATLAB[®] é um ambiente de desenvolvimento de algoritmos e análise de dados da *MathWorks Inc.* Para o desenvolvimento deste trabalho foi utilizada a licença registrada em nome da UTFPR.

novas regras, que levem em conta mais fatos ou adequadas a outras topologias, elementos e dispositivos de proteção do SEP.

Para facilitar a organização do trabalho, as regras foram divididas em subgrupos de acordo com o elemento ao qual referem-se. Foram assim produzidas regras para interpretar faltas em linhas de transmissão, transformadores, bancos de capacitores em derivação e barramentos do tipo barra principal e de transferência.

As regras dividem-se ainda em dois níveis de inferência. O primeiro nível faz a inferência a partir dos fatos iniciais da memória de trabalho, carregados a partir do arquivo de dados de entrada fornecido pelo módulo 1. Como resultado desta inferência de primeiro nível, também são produzidos novos fatos, além das mensagens de conclusões enviadas ao usuário. Estes novos fatos são utilizados pelas regras de inferência de segundo nível, que são capazes de identificar ocorrências com faltas múltiplas, fornecendo uma análise mais precisa ao usuário. Faltas múltiplas consistem em ocorrências de maior gravidade, que tem como consequência o desligamento de mais de um elemento do SEP ou a indisponibilidade prolongada de um elemento. Como exemplo, pode-se considerar a ocorrência de uma falta simples, do tipo curto circuito monofásico em uma LT, e uma falha na abertura do DJ que deveria isolar o defeito. Como consequência, há o desligamento da barra por atuação da proteção de retaguarda, caracterizando assim uma falta múltipla. Outro exemplo é a ocorrência de defeito interno em um TR o que provocaria a atuação de mais de um dispositivo de proteção e permaneceria indisponível ao sistema até ser reparado ou substituído.

Para exemplificar, o Quadro 4 mostra uma regra de primeiro nível de inferência para falta do tipo curto-circuito entre fases de linha de transmissão.

Regra 1:	
Se	(21Z1 ?name DESLIGAMENTO) E (DJ ?name ABERTO)
Então	Fato novo: (FALTA_FASES ?name) Mensagem: "Ocorreu falta entre fases da ?name"

Quadro 4: Exemplo de regra para falta em linha de transmissão.
Fonte: Autoria própria.

Essa regra é ativada pela existência de dois fatos, vistos entre parênteses, no campo condicional "se". A atuação do relé de proteção 21Z1, relé de distância de primeira zona, e a mudança de estado do DJ para aberto. A

conclusão desta regra é vista no campo "**Então**" e produz um novo fato para atualizar a memória de trabalho, registrando que houve uma falta do tipo curto-circuito entre fases e também informa este fato ao usuário através do campo mensagem.

O campo "?name" da regra 1 é uma variável que faz a captura do nome da linha de transmissão ao qual o fato pertence. Desta forma esta regra é capaz de identificar falta em qualquer linha de transmissão, sempre que atuar a proteção de distância de primeira zona 21Z1, não sendo necessária a existência de uma regra para cada elemento em específico.

Considerando a existência dos fatos do Quadro 3, na memória de trabalho, e da regra do Quadro 4, na base de regras, o mecanismo de inferência avalia que existem os fatos necessários para ativar a regra 1. O resultado desta inferência é a inserção do novo fato na memória de trabalho.

Novo fato:

FALTA_FASES LT1

E a mensagem ao usuário:

"Ocorreu falta entre fases da LT1".

Através das mensagens o usuário é informado dos resultados parciais das inferências, sempre que uma regra é ativada. Com isto é possível saber qual a lógica que o sistema utiliza para chegar ao resultado final da análise, dando mais consistência ao resultado e oferecendo mais confiabilidade para o usuário. Além disto, se não for possível chegar a um resultado final detalhado, o usuário ainda dispõe de resultados parciais e poderá retirar suas próprias conclusões com base nisso.

Para que uma regra de segundo nível de inferência seja ativada é necessária a existência de fatos gerados a partir de regras de primeiro nível. Para exemplificar, o Quadro 5 mostra um conjunto de fatos iniciais, supostamente retirados de um relatório de SOE, representando a atuação de proteções para uma falta localizada em um transformador.

Fato 1	63T TR-A DESLIGAMENTO
Fato 2	87T TR-A DESLIGAMENTO
Fato 3	DJ1 TR-A ABERTO

Quadro 5: Exemplo de fatos para falta em transformador.

Fonte: Dados fictícios, autoria própria.

O fato 1 tem o registro da atuação de proteção 63T, fluxo de óleo ou formação de gás no tanque principal do transformador. O fato 2 informa a atuação do rele 87T, relé diferencial da área do transformador. Já o fato 3 registra a mudança para o estado aberto do DJ do transformador TR-A, indicando que este foi desligado.

No Quadro 6 estão três regras para faltas em transformadores. As regras 2 e 3 são regras de primeiro nível de inferência. Já a regra 4 é de segundo nível.

Regra 2:	
Se	(63T ?name DESLIGAMENTO) E (DJ ?name ABERTO)
Então	Fato novo: (DELTA_PRESSAO ?name) Mensagem: "Ocorreu variação na pressão do tanque principal do transformador ?name"
Regra 3:	
Se	(87T ?name DESLIGAMENTO) E (DJ ?name ABERTO)
Então	Fato novo: (FALTA_DIFERENCIAL ?name) Mensagem: "Ocorreu falta na zona protegida pelos TCs do transformador ?name"
Regra 4:	
Se	(DELTA_PRESSAO ?name) E (FALTA_DIFERENCIAL ?name)
Então	Mensagem: "Provável curto-circuito interno ao tanque principal do transformador ?name. Proceder com inspeção visual e ensaios nos enrolamentos antes de reenergizar."

Quadro 6: Exemplo de regras para faltas em transformador.

Fonte: Autoria própria.

Ao realizar a inferência, considerando os fatos do Quadro 5 como a memória de trabalho inicial, o sistema ativa as regras 2 e 3. A regra 2 é ativada pela atuação da proteção 63T, relé de fluxo de óleo ou formação de gás no tanque

principal do transformador, e pela abertura do DJ do transformador e produz como resultado o fato 4, do Quadro 7, atualizando a memória de trabalho. A regra 3 é ativada pelo atuação da proteção 87T, relé diferencial da área do transformador, e pela abertura do DJ do transformador e produz como resultado o fato 5, do Quadro 7, atualizando a memória de trabalho.

Fato 4	DELTA_PRESSÃO TR-A
Fato 5	FALTA_DIFERENCIAL TR-A

Quadro 7: Fatos produzidos pelas regras 2 e 3.

Fonte: Autoria própria.

Com a memória de trabalho atualizada, pelos fatos do Quadro 7, o mecanismo de inferência ativa a regra 4, exemplificando uma inferência de segundo nível. Esta regra avalia, pelo fato 4, que ocorreu aumento da pressão interna do tanque principal transformador, simultaneamente com o fato 5, que informa a ocorrência de curto-circuito dentro da zona de proteção do relé diferencial do transformador. Estas sinalizações são características da ocorrência de defeito interno aos enrolamentos do transformador. Um curto-circuito nos enrolamentos imersos em óleo isolante provoca formação de gases e rápido aumento da pressão interna do tanque. O resultado da análise feita pela regra 4 é um diagnóstico mais preciso da falta fornecendo a seguinte mensagem ao usuário.

"Provável curto-circuito interno ao tanque principal do transformador TR-A. Proceder com inspeção visual e ensaios nos enrolamentos antes de reenergizar."

Para melhor apresentação da base de regras desenvolvida, esta foi dividida em dois grupos. As regras de primeiro nível de inferência estão no grupo A e as de segundo nível no grupo B. Ao todo foram desenvolvidas treze regras de primeiro nível de inferência as quais estão apresentadas no Quadro 8.

Grupo A	Regra A01: Defeito bifásico ou trifásico em LT por proteção de distância.	
	Se	(21 ?name DESLIGAMENTO) E (DJ ?name ABERTO)
	Então	Fato novo: (FALTA_FASES_LT ?name) Mensagem: "Falta bifásica ou trifásica na LT-?"name."
	Regra A02: Defeito fase-terra em LT por proteção de sobrecorrente direcional.	
	Se	(67 ?name DESLIGAMENTO) E (DJ ?name ABERTO)
	Então	Fato novo: (FALTA_A_TERRA ?name) Mensagem: "Ocorreu uma falta a terra na LT-?"name"
	Regra A03: Defeito entre fases em circuito de TRs ou BCs por proteção de sobrecorrente não direcional.	
	Se	(51F ?name DESLIGAMENTO) E (DJ ?name ABERTO)
	Então	Fato novo: (FALTA_FASES_TR_BC ?name)) Mensagem: "Ocorreu falta envolvendo fases do circuito ?name"
	Regra A04: Defeito fase-terra em circuito de TRs ou BCs por proteção de sobrecorrente não direcional.	
	Se	(51N ?name DESLIGAMENTO) E (DJ ?name ABERTO)
	Então	Fato novo: (FALTA_A_TERRA_TR_BC ?name)) Mensagem: "Ocorreu falta a terra no circuito ?name"
	Regra A05: Defeito na zona de proteção dos TCs do TR por proteção diferencial	
	Se	(87T ?name DESLIGAMENTO) E (DJ ?name ABERTO)
	Então	Fato novo: (FALTA_DIFERENCIAL_T ?name)) Mensagem: "Falta entre TCs do TR ?name"
	Regra A06: Variação da pressão ou formação de gás no tanque principal do TR por proteção relé Buchhols.	
	Se	(63T ?name DESLIGAMENTO) E (DJ ?name ABERTO)
	Então	Fato novo: (FALTA_BUCHHOLZ_T ?name)) Mensagem: "Falta interna no tanque principal do TR ?name"
	Regra A07: Defeito no tanque do comutador sob carga do TR por proteção de fluxo de óleo.	
	Se	(63C ?name DESLIGAMENTO) E (DJ ?name ABERTO)
Então	Fato novo: (FALTA_FLUXO_T ?name)) Mensagem: "Falta interna no tanque do comutador do TR ?name"	
Regra A08: Defeito em elemento capacitor de potência por proteção de desequilíbrio.		
Se	(60 ?name DESLIGAMENTO) E (DJ ?name ABERTO)	
Então	Fato novo: (FALTA_ELEMENTO_BC ?name)) Mensagem: "Falta em elemento do BC-?"name"	
Regra A09: Desligamento de BC por sobretensão na barra ou no sistema.		
Se	(59 ?name DESLIGAMENTO) E (DJ ?name ABERTO)	
Então	Fato novo: (SOBRE_V_BC ?name)) Mensagem: "Desligado BC-?"name devido sobretensão no sistema."	
Regra A10: Falta na zona de proteção dos TCs da barra por proteção diferencial.		
Se	(87B ?barra DESLIGAMENTO) E (86B ?barra ATUADO)	
Então	Fato novo: (FALTA_DIFERENCIAL_B ?barra)) Mensagem: "Falta entre TCs da barra ?barra."	

Quadro 8: Regras de primeiro nível que formam o módulo 2: base de regras (continua)
Fonte: Autoria própria.

Grupo A	Regra A11: Desligamento de barra devido a falha na abertura de DJ de LT.	
	Se	(86B ?barra ATUADO) E (50BF ?name DESLIGAMENTO) E ((21 ?name DESLIGAMENTO)OU(67 ?name DESLIGAMENTO))
	Então	Fato novo: (FALHA_DJ_LT ?name) Mensagem: "Atuou a 86B da barra ?barra devido a falha na abertura do DJ da LT-?name"
	Regra A12: Desligamento de barra devido a falha na abertura de DJ de BC.	
	Se	(86B ?barra ATUADO) E (50BF ?name DESLIGAMENTO) E ((59 ?name DESLIGAMENTO) OU (60 ?name DESLIGAMENTO) OU (51N ?name DESLIGAMENTO) OU (51F ?name DESLIGAMENTO))
	Então	Fato novo: (FALHA_DJ_BC ?name) Mensagem: "Atuou a 86B da barra ?barra devido a falha na abertura do DJ do BC-?name"
	Regra A13: Desligamento de barra devido a falha na abertura de DJ de TR.	
	Se	(86B ?barra ATUADO) E (50BF ?name DESLIGAMENTO) E ((51N ?name DESLIGAMENTO) OU (51V ?name DESLIGAMENTO) OU (63C ?name DESLIGAMENTO) OU (63T ?name DESLIGAMENTO) OU (87T ?name DESLIGAMENTO))
	Então	Fato novo: (FALHA_DJ_TR ?name) Mensagem: "Atuou a 86B da barra ?barra devido a falha na abertura do DJ do TR-?name"

Quadro 8: Regras de primeiro nível que formam o módulo 2: base de regras (conclusão)
Fonte: Autoria própria.

As sete regras de segundo nível de inferência estão organizadas no grupo B e apresentadas no Quadro 9.

Grupo B	Regra B01: Falta dupla em LT, defeito entre fases envolvendo a terra.	
	Se	(FALTA_FASES_LT ?name)E(FALTA_A_TERRA ?name)
	Então	Fato novo: (FALTA_DUPLA_LT ?name) Mensagem: "Ocorreu falta entre fases envolvendo a Terra na LT-?name"
	Regra B02: Falta dupla em BC, sobrecorrente e defeito em elemento.	
	Se	((FALTA_A_TERRA_BC ?name) OU (FALTA_FASES_BC ?name)) E (FALTA_ELEMENTO_BC ?name)
	Então	Fato novo: (FALTA_DUPLA_BC ?name) Mensagem: "Provável explosão de elemento capacitor de potência do BC-?name. Proceder com inspeção visual e ensaios antes de reenergizar."
	Regra B03: Falta dupla em TR, diferencial e buchholz, defeito interno ao tanque principal do TR.	
	Se	(FALTA_BUCHHOLZ_TR ?name) E (FALTA_DIFERENCIAL_TR ?name)
	Então	Fato novo: (FALTA_TANQUE_TR ?name) Mensagem: "Provável curto-circuito interno ao tanque principal do transformador TR-?name. Proceder com inspação visual e ensaios nos enrolamentos antes de reenergizar."

Quadro 9: Regras de segundo nível que formam o módulo 2: base de regras (continua)
Fonte: Autoria própria.

Grupo B	Regra B04:	
	Falta dupla em TR, diferencial e fluxo 63C, defeito interno ao tanque do comutador sob carga.	
	Se	(FALTA_FLUXO_TR ?name) E (FALTA_DIFERENCIAL_TR ?name)
	Então	Fato novo: (FALTA_COMUTADOR_TR ?name) Mensagem: "Provável curto-circuito interno ao tanque do comutador do transformador TR-?name. Proceder com inspeção visual e ensaios no comutador antes de reenergizar."
	Regra B05:	
	Falta dupla externa ao TR, diferencial e sobrecorrente, sem buchhols e fluxo.	
	Se	((FALTA_A_TERRA_TR ?name) OU (FALTA_FASES_TR ?name)) E (FALTA_DIFERENCIAL_TR ?name) E (NÃO(FALTA_FLUXO_TR ?name)) E (NÃO (FALTA_BUCHHOLZ_TR ?name))
	Então	Fato novo: (FALTA_DUPLA_EXTERNA_TR ?name) Mensagem: "Provável falta externa ao transformador, mas dentro da zona dos TCs do TR-?name. Proceder com inspeção visual nos bays do TR-?name."
	Regra B06:	
	Defeito grave em TR, buchhols e fluxo, defeito interno no tanque principal e no tanque do comutador.	
	Se	(FALTA_FLUXO_TR ?name) E (FALTA_BUCHHOLZ_TR ?name)
	Então	Fato novo: (DEFEITO_GRAVE_TR ?name) Mensagem: "Provável curto-circuito GRAVE interno ao transformador, RISCO DE EXPLOSÃO E INCÊNDIO no TR-?name. Manter distância de segurança durante inspeção no TR-?name."
Regra B07:		
Falta entre TC e DJ de TR, sobreposição de zonas de proteção, diferencial da barra e sobrecorrente do TR.		
Se	(FALTA_DIFERENCIAL_B ?barra) E ((FALTA_A_TERRA_TR ?name) OU (FALTA_FASES_TR ?name))	
Então	Fato novo: (FALTA_ZONA_DUPLA ?name) Mensagem: "Defeito localizado entre o DJ e o TC do TR-?name"	

Quadro 9: Regras de segundo nível que formam o módulo 2: base de regras (conclusão)
Fonte: Autoria própria.

O módulo 2 foi desenvolvido no programa CLIPS, através da implementação da base de regras, com um total de vinte regras. A leitura dos fatos iniciais para a memória de trabalho inicial é feita do arquivo de saída do módulo 1, no formato texto, arquivo fatos.bat.

A base de regras poderá ser ampliada com a criação de mais regras de inferência. Isto é particularmente necessário para adaptar o sistema a outras topologias de subestações, bem como para a adição de outros elementos com dispositivos de proteção diferentes daqueles utilizados no protótipo.

4. RESULTADOS

Para validar as regras que compõem a base de conhecimento foram utilizados dados fornecidos pela Companhia paranaense de energia elétrica (Copel) produzidos pelo sistema de supervisão e controle deste agente do SEP em ocorrências reais, de acordo com o formato de relatório de SOE mostrado no quadro 2. Para manter o sigilo necessário a estas informações não foram incluídos neste trabalho os arquivos originais de SOE, bem como foram omitidas as datas e locais das ocorrências.

Foram usados diversos relatórios de ocorrências, contendo SOEs reais com registros de todas as proteções da subestação protótipo, a fim de avaliar todas as regras desenvolvidas.

O mecanismo de inferência utilizado para avaliar as regras foi o CLIPS, conforme definido no tópico 3.1. Para melhor analisar os resultados obtidos os tópicos seguintes estão divididos conforme o tipo de teste realizado, com seus respectivos resultados.

4.1 ESTUDO DE CASO: FALTA EM LINHA DE TRANSMISSÃO

Para testar o desempenho do SE utilizou-se relatórios de SOE referentes a faltas em LTs. Ao todo foram avaliados 6 casos de faltas em LTs, sendo que os mesmos são de subestações diferentes, mas todas com a topologia barra principal e transferência nos níveis de tensão de 138 kV e 230 kV. As ocorrências usadas para testes continham defeitos do tipo falta fase terra, falta entre fases, falta entre fases envolvendo a terra, desta forma foram testadas todas as regras desenvolvidas para defeitos em LTs.

Para todos os relatórios de SOEs, referentes a ocorrências em LTs, submetidos ao SE o resultado foi satisfatório, com 100% de acerto na análise automática, comparando com a análise manual feita pela pós-operação do agente fornecedor dos dados. Desta forma fica caracterizada a validade das regras desenvolvidas para identificar este tipo de defeito.

A fim de exemplificar uma análise automática, a Figura 7 mostra a tela do SE com os fatos iniciais extraídos da SOE, pelo módulo 1, para uma falta entre fases de uma LT. Na sequência a Figura 8 apresenta a tela com o resultado da análise automática feita pelo SE, usando a base de regras do módulo 2.

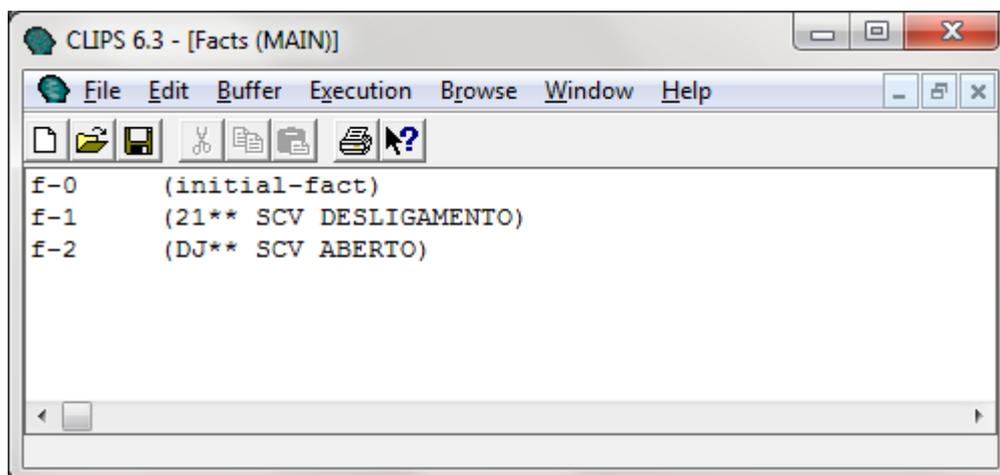


Figura 7: Fatos iniciais de uma falta em LT.
Fonte: Autoria própria.

Vê-se na Figura 7 que houve a atuação da proteção de distância da LT, feita pelo relé 21, que atua para defeitos envolvendo duas ou três fases e que o DJ da LT abriu eliminando assim a falta.

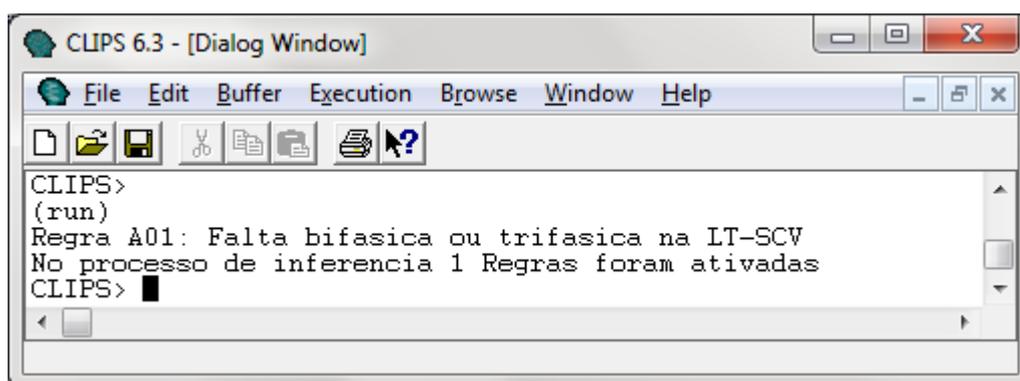


Figura 8: Resultado da análise automática de uma falta em LT.
Fonte: Autoria própria.

A análise automática, mostrada na Figura 8, indica que a regra A01 foi ativada, fornecendo assim uma mensagem de conclusão para o usuário.

4.2 ESTUDO DE CASO: FALHA DE DISJUNTOR

Também foram avaliadas pelo SE ocorrências mais graves, como falha de disjuntor. Uma ocorrência deste tipo submetida a análise consiste na falta em LT, com subsequente falha na abertura do DJ. A Figura 9 mostra a tela do SE com os fatos iniciais extraídos do SOE, pelo módulo 1, para falha de DJ. Na sequência a Figura 10 mostra a tela com o resultado da análise automática feita pelo SE, usando a base de regras do módulo 2.

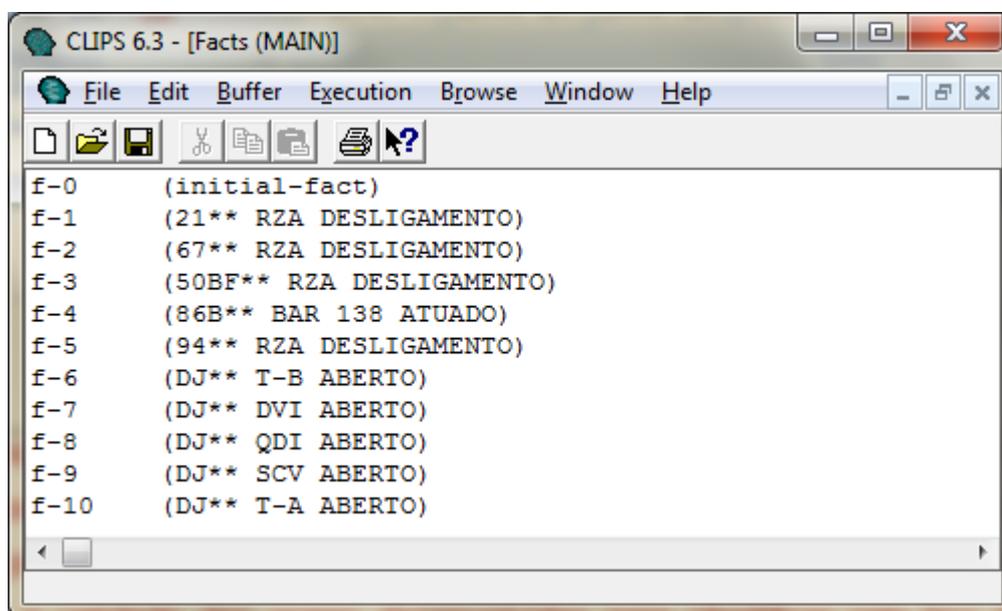


Figura 9: Fatos iniciais de uma falha de DJ.
Fonte: Autoria própria.

Na Figura 9 estão os fatos iniciais mostrando que houve atuação da proteção de distância e de sobrecorrente direcional da LT, relés 21 e 67 respectivamente, indicando que ocorreu uma falta entre fases envolvendo a terra na LT. Ainda há a indicação da atuação da proteção para falha de DJ, relé 50BF e consequente atuação da chave de bloqueio de barra 86B, ocasionando a abertura de todos os DJs da barra. Porém não ocorreu a abertura do DJ do circuito em que ocorreu a falta.

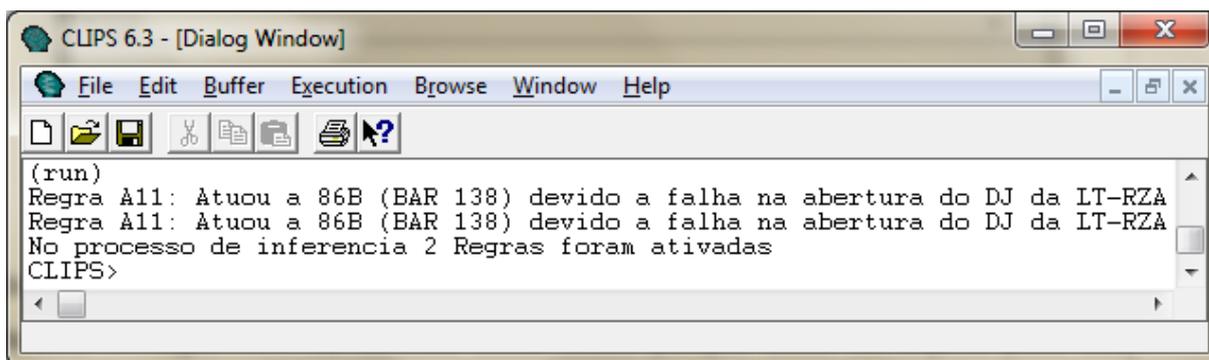


Figura 10: Resultado da análise automática de uma falha de DJ.

Fonte: Autoria própria.

A análise automática, mostrada na Figura 10, indica que a regra A11 foi ativada, fornecendo assim uma mensagem de conclusão para o usuário. A regra A11 foi ativada duas vezes porque duas condições para sua ativação existem de forma simultânea. Uma delas é a ocorrência de falta fase-terra indicada pelo relé 67 e a outra de defeito entre fases indicada pelo relé 21. Isto dá maior ênfase no acerto da conclusão feita pela análise automática.

4.3 ESTUDO DE CASO: FALTA EM BANCO DE CAPACITOR

A ativação das regras de segundo nível de inferência foi testada a partir da SOE oriunda de uma ocorrência em BC. Nesta ocorrência houve defeito interno em um elemento do capacitor de potência provocando desequilíbrio nas correntes das fases do BC. Como o defeito no elemento capacitor foi grave, ocasionou também fuga de corrente para a estrutura do BC caracterizando assim uma falta a terra.

Devido a ocorrência de dois tipos de defeito no elemento BC, o SE deve ser capaz de identificar estes defeitos de forma isolada, com base nas regras de primeiro nível de inferência do Quadro 8, e ainda fornecer uma conclusão mais detalhada da ocorrência, com base nas regras de segundo nível de inferência definidas no Quadro 9.

A Figura 11 mostra a tela do SE com os fatos iniciais extraídos do SOE, pelo módulo 1 e a Figura 12 mostra a tela com o resultado da análise automática feita pelo SE.

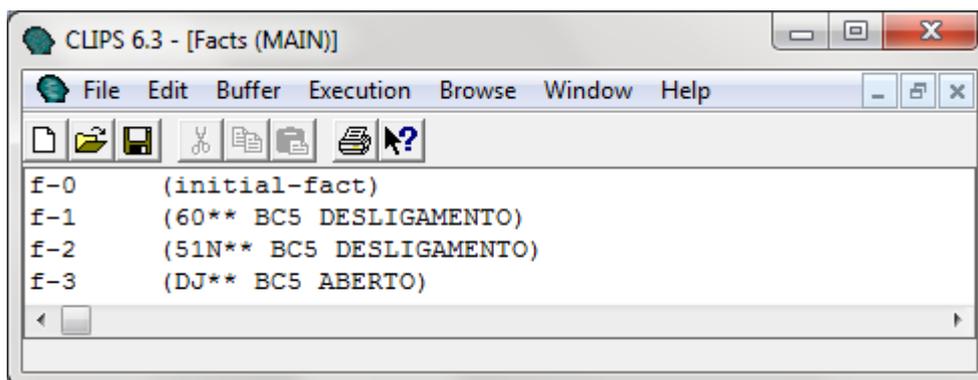


Figura 11: Fatos iniciais de uma falta em BC.
Fonte: Autoria própria.

Na Figura 11 pode-se ver que o SE identificou corretamente a atuação da proteção de desequilíbrio de corrente para defeito interno em elementos capacitivos, relé 60, e também do relé 51N proteção de sobrecorrente para terra.

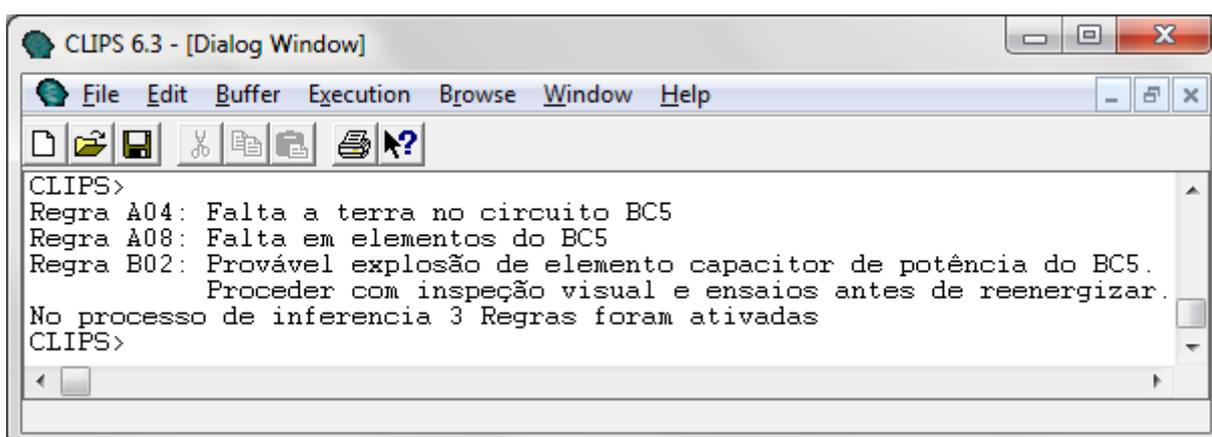


Figura 12: Resultado da análise automática de uma falta em BC.
Fonte: Autoria própria.

No processo de inferência da análise automática, mostrada na Figura 12, houve a ativação das regras de primeiro nível de inferência A04 e A08, informando corretamente a ocorrência de falta a terra e defeito em elemento capacitor, respectivamente. A regra B02, de segundo nível de inferência, foi ativada a partir dos novos fatos gerados pelas regras A04 e A08 e atualizados na memória de trabalho durante o processo de inferência.

A Figura 13 mostra a memória de trabalho após o processo de inferência e a conclusão ser fornecido ao usuário.

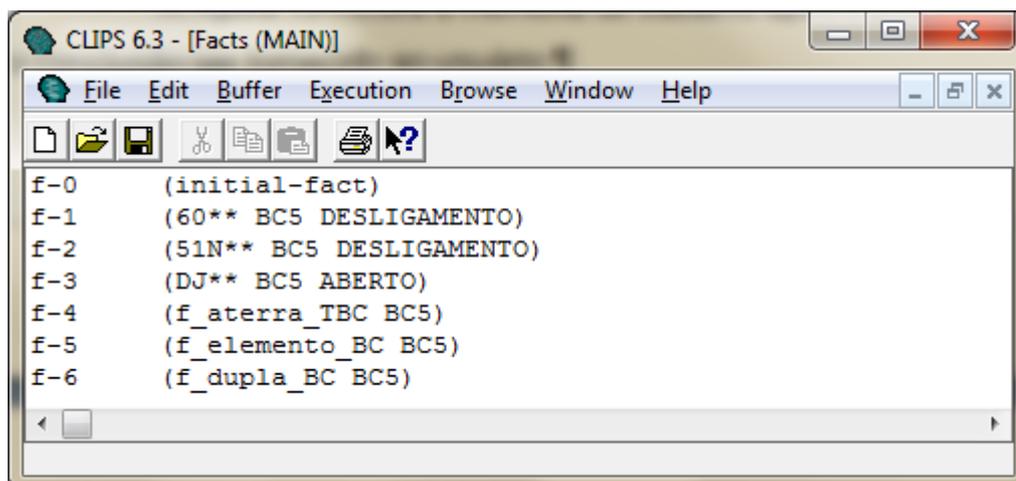


Figura 13: Memória de trabalho atualizada após a análise automática.
Fonte: Autoria própria.

Além dos fatos iniciais a tela da Figura 13 mostra a memória de trabalho atualizada. Novos fatos foram inseridos e atualizados na memória de trabalho durante o processo de inferência. O fato 4 foi inserido pela regra A04 representando a falta a terra. O fato 5 foi inserido pela regra A08, registrando o defeito em elemento capacitor. Os fatos 4 e 5 são as premissas que ativam a regra B02. Por fim o fato 6 foi inserido pela regra B02 para registrar a conclusão final. Isto mostra como novos fatos gerados a partir da conclusão das regras podem ser usados como premissas em outras regras. Esta dinâmica de inferência e atualização da memória de trabalho é, de forma particular, essencial para permitir que novas regras venham a ser desenvolvidas promovendo a evolução do sistema proposto. Estas novas regras podem utilizar como premissas fatos gerados a partir das regras já existentes e ainda criar novos fatos realimentando a memória de trabalho.

É importante lembrar que o processo de inferência realizado pelo SE é único e se baseia na análise dinâmica das regras e fatos existentes, fazendo uma busca heurística⁷ por possíveis conclusões.

⁷ Busca heurística: processo de raciocínio e busca por caminhos possíveis para solução de problemas.

4.4 ESTUDO DE CASO: MANOBRAS E ENSAIOS EM PROTEÇÃO

Para avaliar possíveis conclusões errôneas da análise automática utilizou-se de relatórios de SOEs contendo registros de eventos que não estão relacionados a faltas no SEP. Foram utilizados SOEs de manobras em subestações, contendo registros de abertura e fechamento de DJs e também SOEs de ensaios em relés de proteção, contendo registros de atuação de proteção, mas sem abertura e fechamento de DJs.

A Figura 14 mostra os dados extraídos pelo módulo 1, quando submetido a uma SOE de manobra no sistema. A Figura 15 mostra a tela com o resultado da análise automática.

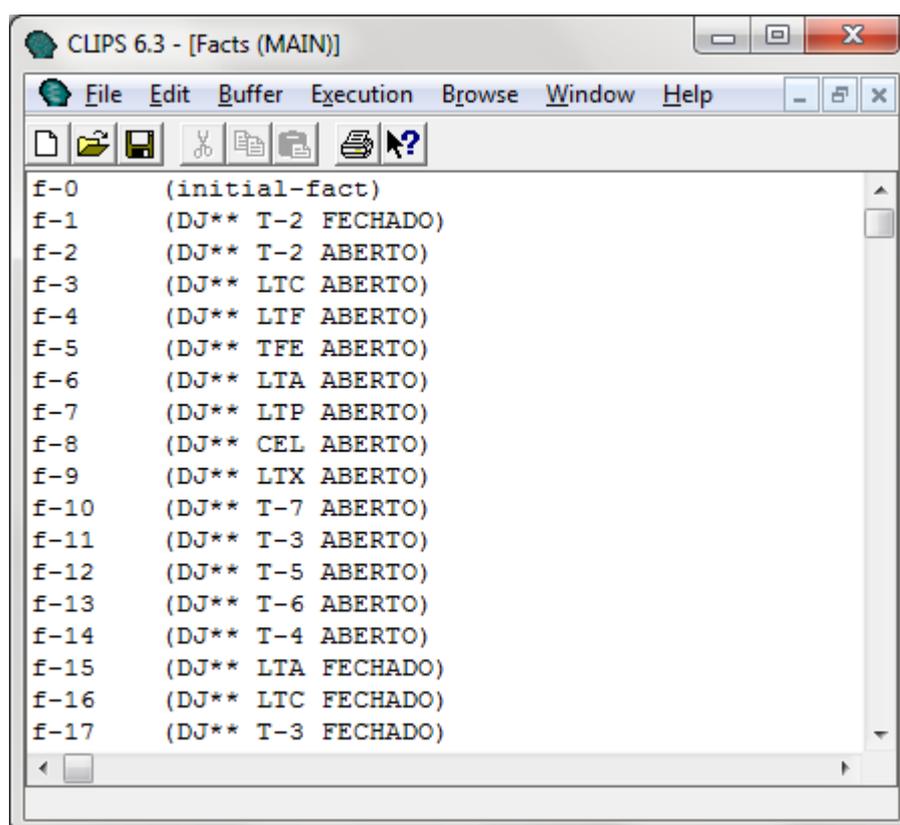


Figura 14: Fatos de uma manobra no SEP.
Fonte: Autoria própria.

Um total de 17 fatos foram extraídos da SOE original pelo módulo 1 e fornecidos como memória de trabalho inicial para o SE. Todos os registros são referentes a comandos de abertura e fechamento em DJs e não há nenhuma atuação de proteção, o que evidencia ser uma SOE de manobra em subestação.

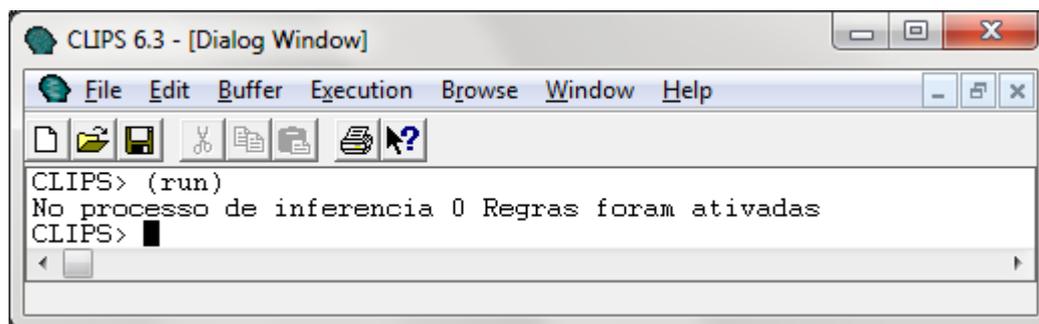


Figura 15: Resultado da análise automática de uma manobra.
Fonte: Autoria própria.

A análise automática conclui corretamente que não houve nenhuma falta no SEP ao não ativar nenhuma regra de inferência.

4.5 ANÁLISE QUALITATIVA DOS RESULTADOS

Ao todo foram realizados testes com quinze SOEs de ocorrências reais no SEP. Estas ocorrências possuíam registros de faltas em LT, BC e barramentos e algumas com faltas em mais de um elemento, ou seja, faltas múltiplas.

Qualitativamente os resultados mostraram a validade das regras de interpretação desenvolvidas ao chegarem a conclusões iguais as análises manuais feitas nas SOEs. Particularmente para LT e BC o acerto foi de 100% das análises automáticas em comparação com as análises manuais. Para faltas em transformadores não foi possível realizar testes e validação das regras devido a indisponibilidade de dados reais.

Uma limitação importante do sistema se dá para defeitos em barramentos que não possuem proteção diferencial de barra, rele 87B. Nestes casos a proteção da barra é feita pela proteção temporizada dos extremos opostos dos circuitos que estão conectados ao barramento. Usando a subestação protótipo para exemplificar e supondo que esta não possua a proteção por rele diferencial na barra, em caso de defeito tem-se: a atuação do rele 51 dos circuitos de conexão dos TRs A e B; o desligamento das LTs 1 e 2 se daria apenas no extremo das subestações adjacentes; Os DJs 1 e 2 abririam pela proteção dos TRs; os DJs 4, 5 e 6 permaneceriam fechados. Nos testes realizados o SE identificou como causa da

falta curto-circuito nos circuitos dos TRs. Para realizar esta análise com eficiência é necessário dispor dados das subestações adjacentes e sincroniza-los através da estampa de tempo da SOE.

Os testes com dados falsos, ou seja, SOE reais mas com registros de manobras e ensaios de proteção, também obtiveram sucesso. Nestes casos a análise automática não indicou a existência de nenhum defeito o que está correto já que os registros da SOE são de comandos voluntários sobre os DJ e atuações de proteção sem abertura de DJs.

Um dos maiores benefícios obtidos pelo sistema foi a redução no número de alarmes feita pelo modulo 1 ao filtrar e extrair somente os fatos relevantes da SOE. Este é um dos problemas que motivaram o desenvolvimento do SE e sua solução faz parte dos objetivos deste trabalho. Para quantificar esta redução cita-se o teste realizado com uma SOE de falta em uma barra. Esta SOE possui um total de 576 registros de pontos em alarme em um intervalo de tempo de 4 minutos, sendo que no primeiro minuto ocorreram 480 dos registros de alarmes. O módulo 1 extraiu 9 fatos relevantes do total de 576, ignorando todos os fatos irrelevantes para a análise da ocorrência. Se considerarmos que o sistema de supervisão e controle pode apresentar um total de quarenta registros em uma tela teríamos um total de doze telas de alarmes apresentadas ao operador no primeiro minuto da ocorrência. O esquema proposto filtrou estes dados, resultando em nove linhas de fatos relevantes e mais algumas linhas para apresentar a conclusão da análise automática.

5. CONCLUSÕES E FUTUROS TRABALHOS

Como resultado principal deste trabalho propõem-se uma metodologia para implementação de sistemas de análise automática de faltas no SEP através do uso de SOE. A Figura 6 mostrou o diagrama em blocos do sistema proposto que divide-se em dois principais blocos. Um deles, o módulo 1, tem a função de realizar a tradução das informações dos sistemas de supervisão e controle para que um SE possa compreendê-los e também faz uma filtragem das informações relevantes. O módulo 2 consiste em uma base de regras desenvolvida a partir do conhecimento de operadores do SEP os quais são os especialistas no assunto.

Propõe-se o uso de um mecanismo de inferência já desenvolvido, o CLIPS, como ferramenta para a análise automática dos dados.

No que tange aos objetivos deste trabalho de conclusão de curso, todos foram alcançados propondo-se a metodologia acima descrita para resolver o problema da análise manual de faltas no SEP.

Aponta-se que a implementação de sistemas de análise automática é viável, porém não devem substituir a análise manual realizada pelo operador em tempo real, apenas ser mais uma ferramenta de auxílio na interpretação e tomada de decisão. Dentre as contribuições que a implementação destes sistemas podem trazer para a operação pode-se citar a redução do número de alarmes apresentados ao operador reduzindo, os fatores pressão, estresse e ansiedade, já que o sistema irá transmitir ao operador uma ideia mais clara do problema que originou os alarmes presentes na SOE. Além disto poderá recomendar ações corretivas para o operador, se necessário, com base nas instruções de operação da empresa. Isto torna a sua aceitação pelos usuários mais fácil e ao mesmo tempo minimiza a duração das interrupções diminuindo os riscos de falha humana.

Não se propôs uma tecnologia específica para a implementação, pois esta pode variar conforme os sistemas já existentes em cada concessionária. Além do que a tecnologia pode se tornar obsoleta, enquanto o modelo de inteligência artificial pode ser facilmente adaptado a qualquer linguagem de programação.

É importante ressaltar que a base de regras desenvolvida só é aplicável para subestações com topologia igual a da subestação protótipo, ou seja, barra principal e de transferência ou barra dupla com um disjuntor. Para instalações com

topologias diferentes, como barra em anel ou disjuntor e meio, novas regras devem ser desenvolvidas considerando a filosofia adequada para os dispositivos de proteção. O mesmo também deve ser feito para novos elementos a serem conectados na subestação como geradores e reatores em derivação. Isto deixa espaço para o desenvolvimento de futuros trabalhos que venham a complementar este.

Outro ponto a ser explorado em trabalhos futuros é o uso da estampa de tempo da SOE para realizar o cruzamento de informações de mais de uma subestação, possibilitando o diagnóstico com base nas informações dos dois extremos de uma LT, por exemplo. Esta abordagem passa a ser muito útil quando o modelo de operação empregado é centralizado em um centro de operação que tem controle sobre uma região geo-elétrica.

Do ponto de vista acadêmico o desenvolvimento deste trabalho se concretizou em uma ótima oportunidade para aplicar os conceitos vistos na teoria. Além de que possibilitou a ampliação do conhecimento do acadêmico especialmente na área de inteligência artificial.

6. REFERÊNCIAS

ANTUNES, Fábio A. D. S.; SILVEIRA, Paulo M. D. Sistema de Diagnóstico de Perturbações em Tempo Real. **XI EDAO - Encontro para Debates de Assuntos de Operação**, Florianópolis - SC, 22 a 26 novembro 2010.

BATISTA, Luana et al. Sistema Híbrido Inteligente para Tratamento de Alarmes e Diagnóstico de Falhas em Redes Elétricas. **XXV Congresso da Sociedade Brasileira de Computação**, São Leopoldo - RS, 22 a 29 julho 2005.

CARDOSO JR, Ghendy; ZÜRN, Hans H.; ROLIM, Jacqueline G. Diagnóstico de faltas em sistemas de potência: definição do problema e abordagens via inteligência artificial. **Revista Controle & Automação**, Porto Alegre, Abril, Maio e Junho 2004. 215-229.

ELISEI, José L.; OSTELLINO, Renato. **Um sistema especialista em orçamento para uma empresa de fundição de aço**. 2003. Monografia (Especialista em Informática Empresarial), Faculdade de Engenharia da Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá - SP, 2003.

KEZUNOVIC, Mladen. **IEEE Tutorial on Automated Fault Analysis**. Texas - EUA: IEEE, 2001.

KEZUNOVIC, Mladen; GUAN, Yufan. Intelligent Alarm Processing: From Data Intensive to Information Rich. **42nd Hawaii International Conference on System Sciences - IEEE**, Waikoloa - Hawaii, 2009.

KIMURA, Sergio et al. Aplicação do IEC 61850 no Mundo Real. **Elektro Eletricidade e Serviços S.A. e Schweitzer Engineering Laboratories Inc.**, Campinas, 2008.

KINDERMANN, Geraldo. **Curto-circuito**. 4. ed. Florianópolis: Edição do autor, 2007.

KINDERMANN, Geraldo. **Proteção de sistemas elétricos de potência**. Florianópolis - SC: Edição do autor, v. 3, 2008.

LENZ, Everton P.; ROLIM, Jacqueline G. Aplicação de Oscilografias e Sequência de Eventos para avaliação do desempenho de relés de proteção de geradores. **IX INDUSCON - IEEE International Conference on Industry Applications**, São Paulo, 8 a 10 novembro 2010.

LEVINE, Robert I.; DRANG, Diane E.; EDELSON, Barry. **Inteligência artificial e sistemas especialistas**. São Paulo: McGraw-Hill, 1988.

MEDEIROS, Eudes B. et al. Uma nova abordagem para diagnóstico de faltas no sistema elétrico baseado em redes de Petri coloridas. **XII ERIAC - Encontro Regional Ibero-americo do CIGRÉ**, Foz do Iguaçu, 20 maio 2007.

MORETO, Miguel; ROLIM, Jacqueline G. Análise automática de oscilografias em sistemas elétricos de potência. **Revista Controle & Automação**, Porto Alegre, v. 21, n. 4, p. 347-362, Julho e Agosto 2010.

MOROZONI JR., Edson M. **Geração de lista de pontos de supervisão**. 2003. COPEL, Curitiba, 2003.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. **Procedimentos de Rede**. Rio de Janeiro: ONS, 2010.

PAREDES, Adrián E. R. O.; BORTONI, Edson D. C. **Integração de sistemas de supervisão, proteção e automação de subestação de energia elétrica**. 2002. Dissertação (Mestrado em Automação e Sistemas Elétricos Industriais), Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2002.

PEREIRA, Roberto M.; SPRITZER, Ilda M. D. P. A. Automação e digitalização em subestações de energia elétrica: um estudo de caso. **Revista Gestão Industrial**, Ponta Grossa, v. 3, n. 4, p. 147-160, 2007.

RODRIGUES, Marco A. M. et al. Novas tendências para análise automática de faltas e distúrbios em sistemas de potência. **X STPC - Seminário Técnico de Proteção e Controle**, Recife, 17 a 20 outubro 2010.

SERRATO, Eduardo. **Fronteiras paramétricas de eficiência para o segmento de transmissão de energia elétrica no Brasil**. 2006. Dissertação (Mestrado em Economia do Setor Público), Universidade de Brasília, Brasília, 2006.

SOUSA, Weber M. D. et al. Sistema de localização de faltas em linhas de transmissão utilizando dados de dois terminais: experiência da CEMIG. **XVIII SNPTEE - Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica**, Curitiba, 16 a 21 outubro 2005.