

# Aplicação de Sistema Especialista no Diagnóstico da Atuação da Proteção em Subestações Distribuidoras

S. Nicoli; L. C. Magrini; F. Crispino; L. Ogiboski; H. P. Covre; N. J. Salles; E. D. C. Delvecchi; R. O. Milanese

**Resumo** – Este trabalho apresenta os resultados obtidos no projeto de pesquisa e desenvolvimento de um sistema que utiliza inteligência artificial para análise e diagnóstico da atuação da proteção em subestações de distribuição. Para esse fim foram desenvolvidos programas computacionais composto por: simulador computadorizado de disjuntor, um programa servidor que coleta os dados oriundos dos relés, um programa que complementa as informações para análise e principalmente um sistema especialista para a geração de um diagnóstico. Esse sistema é capaz de se adaptar a diferentes tecnologias de relés, diferentes fabricantes e protocolos de comunicação. Além disso, o sistema auxilia na análise dos eventos de atuação da proteção apresentando um diagnóstico realizado a partir da parametrização das curvas de atuação envolvendo as funções de proteção, tempo de atuação dos relés, além do tipo de falta, com as respectivas correntes, tensões e fases envolvidas.

**Palavras-chave** – Automação, Inteligência Artificial, Sistema Especialista e Relés de proteção.

## I. INTRODUÇÃO

Para o desenvolvimento deste projeto sob o número ANEEL PD136 e título “Sistema Multitecnologia e Multi-plataforma para Interpretação e Análise da Atuação da Proteção em Subestações Distribuidoras, foi dado suporte financeiro e técnico pela CPFL – Companhia Paulista de Força e Luz e Companhia Piratininga de Força e Luz, dentro do programa de P&D ANEEL. Este projeto teve como entidades executoras a Expertise Engenharia e FDTE – Fundação para o Desenvolvimento Tecnológico da Engenharia.

Este projeto de desenvolvimento e pesquisa foi realizado de modo a ser adaptável à diversidade de equipamentos da

---

Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico do Setor de Energia Elétrica regulado pela ANEEL e consta dos Anais do VI Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica (VI CITENEL), realizado em Fortaleza/CE, no período de 17 a 19 de agosto de 2011.

Este trabalho teve suporte financeiro da Companhia Paulista de Força e Luz e Companhia Piratininga de Força e Luz, CPFL Paulista e Piratininga.

S. Nicoli, L. C. Magrini, F. Crispino e L. Ogiboski são pesquisadores da Fundação para o Desenvolvimento Tecnológico da Engenharia - FDTE (fcrispino@fdte.org.br, magrini@fdte.org.br, logiboski@fdte.org.br e s.nicoli@fdte.org.br).

H. P. Covre participa do programa de mestrado da EPUSP-PEA.

N. J. Salles trabalha na Companhia Paulista de Força e Luz – CPFL (nj-salles@cpfl.com.br).

E. D. C. Delvecchi e R. O. Milanese trabalham na empresa Expertise Engenharia (rafael@expertise-eng.com.br).

proteção existentes em subestações de distribuição, como foi apontado em levantamento realizado pela CPFL no momento inicial do projeto, no qual, foi constatada a seguinte porcentagem de relés em suas instalações: 71% eletromecânicos, 15% digitais, 9% eletrônicos e 5% estáticos. Diante disso foi concebida uma plataforma contendo diferentes relés de proteção integrados a um sistema computacional e equipamento específico para representar os diferentes tipos de defeitos para diferentes tipos de plantas de subestação. Também foi desenvolvido e integrado a essa plataforma um programa capaz de simular o acompanhamento de um disjuntor.

Cabe ressaltar que os tipos de conhecimentos envolvidos no projeto, e a interligação existente entre eles justificaram o uso de um Sistema Especialista e, por conseguinte o uso de técnicas de engenharia de conhecimento para auxiliar na sua codificação.

## II. DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA

Com relação ao sistema especialista, a pesquisa foi desenvolvida a partir da identificação da técnica de inteligência artificial mais adequada, considerando-se o tipo de conhecimento envolvido. A partir da identificação da técnica de inteligência artificial adotada, passou-se a organização do conhecimento de forma a possibilitar a busca de diagnósticos próximos à realidade do processo de atuação da proteção em subestações de energia elétrica. Neste momento foi utilizada a técnica de levantamento de dados baseada nos conceitos da engenharia de conhecimento. Com base na organização do conhecimento coletado, passou-se para o desenvolvimento e testes do sistema especialista.

### A. Inteligência Artificial

Existem diversas definições de inteligência artificial. Luger [1] a define como o ramo da ciência da computação que se ocupa da automação do comportamento inteligente, mas também afirma que a inteligência em si não é muito bem definida, o que estende essa questão à própria inteligência artificial. Já Russel e Norvig em [2] discute e enquadra as diversas definições em quatro grupos de sistemas que são aqueles que:

- Pensam como seres humanos;
- Atuam como seres humanos;
- Pensam racionalmente;

- Atuam racionalmente.

Praticamente esses grupos fazem uma distinção entre o comportamento humano e o racional.

As diversas linhas teóricas da Inteligência Artificial, como expostas acima, conduziram ao desenvolvimento de diversas técnicas como: Redes Neurais, Lógica Fuzzy, Algoritmos Genéticos, Sistemas Especialistas, Sistemas baseados em casos, dentre outras. Também existem técnicas que combinam outras existentes como, por exemplo, Sistema Especialista com Lógica Fuzzy. Cada uma dessas técnicas possui características próprias e conseguem resolver classes específicas de problemas existentes.

Para que um sistema seja considerado com inteligência artificial é necessário, com base no apresentado em [1] e [2], que ele possua no mínimo as seguintes características: tenha uma representação do conhecimento, faça inferência (raciocínio) a partir do conhecimento, consiga aprender acrescentando novos conhecimentos ou alterando os já existentes, além de utilizar uma técnica de busca no conhecimento existente no sistema. Apesar disso, muitos sistemas desenvolvidos com técnicas de inteligência artificial, deixam de lado a questão de aprendizagem, embora possa utilizá-la, a justificativa é a falta de segurança imediata, sem testes, com relação aos novos conhecimentos obtidos.

Assim a primeira preocupação no desenvolvimento de um *software* de inteligência artificial está relacionada: com a captura do conhecimento a ser utilizado, com a representação do conhecimento, o armazenamento do conhecimento e, por conseguinte com a técnica de inferência a ser utilizada. Para tanto, é necessário saber que tipo de conhecimento será utilizado, assim será possível escolher um tipo de busca adequado para a base de conhecimento.

Em nosso caso o conhecimento a ser utilizado tem a ver com a experiência de um especialista em sistemas de proteção de redes de distribuição de energia.

### B. Sistema Especialista

A técnica de inteligência artificial denominada de Sistema Especialista foi implementada comercialmente na década de 70, apesar de já existirem sistemas desse tipo na década anterior. Nessa abordagem todo o conhecimento é armazenado e utilizado por um código com lógica proposicional que pode lidar com esse conhecimento de diversas formas [1] como: interpretação, projeção (predição) com base nos conhecimentos, diagnóstico (diagnose), projeto (nova estruturação do conhecimento), planejamento, monitoração, depuração de erros, manutenção, instrução e controle. Em nosso caso, o código foi estruturado de modo analisar e obter um diagnóstico dos eventos ligado à proteção.

Um sistema especialista possui em sua base de conhecimento as regras que são utilizadas para avaliar os fatos na chamada inferência que procura imitar o raciocínio de um especialista. O tipo de representação do conhecimento utilizado é chamado de “regras de produção” (ou regras...se...então...), dependendo da ferramenta adotada, existem rotinas agregadas que incluem algoritmos como por exemplo: o algoritmo Rete que é veloz, não passa por todas as

regras durante a inferência, e que também utiliza as regras de maior prioridade, além de considerar o algoritmo de Markov.

Diz-se que um sistema especialista parte de um estado inicial contendo os fatos relevantes para o processamento das regras e chega a um estado final (em geral uma solução para uma questão), contendo novos elementos. Como exemplo é apresentado um conjunto de fatos que representam o estado inicial do processamento de um sistema especialista, cujo processamento resulta em um diagnóstico como estado final. Os nomes dos fatos podem coincidir com uma descrição ou serem uma variável, que em sua maioria começam no exemplo com o prefixo CFG. Em seus conteúdos podem ser encontrados valores binários (0 ou 1), valores numéricos e a descrição de conteúdos. Tem-se na tabela um uma coleção de fatos.

Tabela I. Estado inicial – coleção de fatos.

Operação de sobrecorrente temporizado 1
Operação do sobrecorrente temporizado terra 1
Operação de corrente temporizado em A 1
PRO_GTOC_Str 1
PRO_QTOC_Str 1
Partida de sobrecorrente temporizado A 1
Tempo de atuação do sobrecorrente temporizado 0
Tempo de atuação de neutro sobrecorrente temporizado 1,5
Tempo de atuação de sobrecorrente temporizado de terra 1,5
Tempo de atuação de sobrecorrente temporizado A 1,5
Corrente de falta de fase A (mag) (lado de média tensão) 1278,4
Corrente de falta de fase A (ang) (lado de média tensão) -150
Corrente de falta de fase (ang) (lado de média tensão) 9999
Contato auxiliar Principal tipo b (normalmente fechado) 1
Contato auxiliar Principal tipo a (normalmente aberto) 0
Verificador (Watchdog relé) 0
Subestação Val_0003
Localização P
Tensão Nominal MT
CFG_52 P
CFG_tbo 0,05
Nº Série AAIC07000950
Fabricante GE
Modelo F35
CFG_Iset_50 3504
CFG_Iset_51 600
Curva IEC
CFG_tdm_51 0,1
CFG_shape_51 MUI
CFG_tterr_51 0,5
CFG_Iset_50N 2304
CFG_Iset_51N 120
CFG_curve_51N IEC
CFG_tdm_51N0,2
CFG_shape_51N MUI
CFG_tterr_51N 0,5

Os fatos da tabela I serão utilizados para a inferência com as regras no sistema especialista e dará como resposta o diagnóstico da tabela II.

Tabela III. Estado final – diagnóstico

• Teste 2_CC1FA_PTOC_Alim03.
• Relé de sobrecorrente temporizado de fase atuou de acordo com seu ajuste de pickup.
• O relé atuou corretamente, de acordo com seu tempo de ajuste.
• Falta fase terra (monofásica) Fase A à terra.
• O disjuntor principal ou alimentador abriu após o Trip do relé de sobrecorrente.
• Novas regras

- Val\_0003 - Atuação 51.
- Em  $t = 1,5s$ , no tempo de atuação ajustado. Ajuste: 600 A. Tipo de curva: IEC Curva: MUI. Dial de tempo: 0,1.
- CC1F-T (AG). IccA(medida) = 1278,4 A.
- Val\_0003 - Abertura 52.

### C. Escolha da ferramenta para construção do sistema especialista

Foi feito um levantamento de diversas ferramentas para o desenvolvimento do sistema especialista. Foram identificadas e investigadas 16 ferramentas gratuitas e 22 pagas. Nessa investigação uma classe de sistemas se destacou devido ao fato de todos terem como base a ferramenta CLIPS - C Language Integrated Production System, dentre os quais: o JESS (que utiliza a sintaxe do Clips na linguagem JAVA), o FuzzyCLIPS (que acrescenta o uso da lógica Fuzzy ao Clips), ECLIPS (uma extensão do Clips, que busca melhor desempenho), DYNACLIPS (trabalha com troca de conhecimento dinâmica, e relaciona agentes com o CLIPS), dentre outros. Além disso, foram identificadas possibilidades de integração do Clips com as mais variadas linguagens de programação como: Ruby, Python, "C", dentre outras. Trabalhos como o de Kezunovic e Luo, em [3], e Simo et al em [4], também encorajaram o uso do CLIPS.

Após testes de programação e análise escolheu-se o CLIPS, com as seguintes justificativas: portabilidade com sistemas operacionais atuais, facilidade de utilização com as principais linguagens de programação atuais, gratuidade, e pelo fato de ter sido desenvolvido originalmente pela NASA, que é uma instituição com severos requisitos de confiabilidade. O CLIPS interpreta o conhecimento contido em um arquivo texto de forma adequada. O código do conhecimento no CLIPS está estruturado na forma de Fatos, Regras, e acrescenta Funções e Módulos, seguindo uma linguagem própria, possibilitando uma flexibilidade maior na estruturação do conhecimento.

### D. Levantamento do conhecimento envolvido

Para descobrir as causas das falhas um especialista utiliza a sua experiência para realizar uma análise que conduz de forma assertiva, na maioria das vezes, a um diagnóstico. Espera-se que com a automatização do diagnóstico haja uma diminuição no tempo de obtenção desse diagnóstico.

No estabelecimento da estrutura de conhecimento foram necessários levantamentos de fatos e regras que fazem parte dos conhecimentos utilizados por um especialista em proteção de sistemas de potência e em outras fontes de referência. Existem dificuldades, que devem ser superadas e que são relacionadas com o conhecimento coletado que envolve: ambigüidades, contexto, idioma, sintaxe, semântica, dentre outras. Os conhecimentos utilizados, em nosso caso, são utilizados para diagnosticar os eventos relacionados à atuação da proteção em subestações distribuidoras de energia elétrica.

Basicamente a coleta de conhecimento se inicia com a coleta das informações e o conhecimento obtido junto a especialistas ou outra fonte de informação. Esses conhecimentos

são compilados pelo engenheiro de conhecimento de forma a se transformarem em regras que ajudarão a decidir sobre o problema a ser resolvido. Em alguns casos, em função do tipo de sistema especialista, o engenheiro do conhecimento terá a possibilidade de incluir funções específicas para auxiliarem na regras, elas poderão ser de cálculo ou até para decidirem questões específicas. Por exemplo, as funções foram utilizadas em cálculo fasorial e em equações padronizadas de curvas inversa, extremamente inversa, utilizadas em relés de sobrecorrente, dentre outras. Como resultado do processamento o engenheiro de conhecimento deverá prever mensagens, mostrando a solução do problema. Nessa solução poderão constar: o caminho seguido para a obtenção da solução, mostrando a mudança de conteúdo das variáveis utilizadas, mensagens específicas e a resposta propriamente dita à questão. Já no sistema especialista em funcionamento as entradas serão os fatos, que serão processados com a lógica estabelecida pelas regras e funções definidas e assim produzirão como saída uma resposta às entradas, que em nosso caso será um diagnóstico.

Inicialmente o conhecimento foi considerado de forma genérica e os seus detalhes aumentados. Além de especialistas fontes bibliográficas como em [4], [5], [6], [7], [8], [9] e [10] foram consideradas. Assim, considerou-se que o sistema de proteção serve para evitar que danos maiores ocorram, apesar de haver paralisação da subestação. Quando o sistema de proteção atua sem motivo, ocorreu uma falha, sem ter uma falta. O sistema falhou em atuar, e isso tem que ser corrigido. As falhas podem ocorrer devido a questões como: parametrização errada, defeito interno, resultado de falhas de outros equipamentos, dentre outras causas.

Com base nas informações necessárias para o diagnóstico o levantamento do conhecimento junto ao especialista conduziu a nomeação dos conhecimentos na forma de variáveis. Também foi realizado o desenvolvimento de árvores de decisões (representadas em UML com o uso de diagramas de seqüência) que representam as faltas que conduzem ao diagnóstico.

A representação das árvores de decisões na forma de diagramas de seqüência e a criação de tabelas de referências facilitaram a transformação do conhecimento em regras de produção para a interpretação e análise da atuação da proteção principal de retaguarda. Com base nesse conhecimento organizado, foram criados os fatos, regras, além de funções e módulos do Clips. Foi previsto que os fatos poderiam ser divididos nos seguintes grupos:

- Fatos utilizados para auxílio na execução do código, de interesse apenas para regras do processamento. Por exemplo: parâmetros de tolerância de cálculo, flags de processamento, dentre outros;
- Fatos relevantes para o diagnóstico, utilizados diretamente nas regras, que seriam semelhantes a variáveis tradicionais das linguagens de programação, com uma denominação e um conteúdo, como por exemplo, "Tensão nominal" e conteúdo "AT";
- Fatos com informações complementares aos relés de proteção, cuja quantidade de fatos varia de relé para relé, por exemplo: subestação, identificação do

relé, dentre outros.

Esse agrupamento levou a criação de um arquivo contendo informações com o uso de notação XML, com as informações cadastrais dos relés, que será descrita adiante.

A compilação final do conhecimento utilizado resultou em cerca de 8900 linhas contendo os módulos básicos do sistema especialista, com funções, fatos e regras.

#### E. Cadastro de relés

O cadastro dos relés é um arquivo texto que possui informação complementar que será transformada em fatos e utilizada durante o processamento do sistema especialista. Essas informações são necessárias, pois complementam os dados que não podem ser obtidos durante a operação do sistema. Este arquivo texto contém informações tais como: localização na subestação, disjuntor responsável pelo trip, função principal/retaguarda, curva de atuação para os relés convencionais, fabricante, dentre outros dados. Essas informações praticamente não mudam com o tempo, mantendo-se inalteradas durante o uso do relé instalado. Mas é possível que algumas informações sejam alteradas devido a reparos e manutenções.

O formato do arquivo é texto e a sua estrutura é denominada de marcação, possibilitando a existência de uma quantidade ilimitada de características dos relés. As informações utilizam a notação de marcação denominada de linguagem XML, composta por tags, em um arquivo texto com extensão "xml". Uma tag é representada da seguinte forma: <NOME> conteúdo </NOME>, dessa forma, <NOME> é a parte inicial da tag "Nome" e </NOME> é parte final. Entre a parte inicial e final da tag é colocado um conteúdo, que pode ser de qualquer tipo desde que corresponda a especificação da tag. A representação no XML é hierárquica e pode possuir tags dentro de tags.

A título de esclarecimento é apresentado um exemplo mais específico: <CFG\_Vn>AT</CFG\_Vn>, que informa que a tensão nominal é do tipo AT, onde foi padronizada a tag contendo CFG\_Vn.

Os dados existentes no cadastro de relés são transformados em fatos e utilizados pelo sistema especialista. Algumas dessas informações irão compor de forma complementar o texto apresentado como diagnóstico obtido pela interpretação e análise realizada pelo sistema especialista.

#### F. Programa de diagnóstico

Basicamente o sistema especialista desenvolvido é um programa feito em linguagem própria do Clips. Esse sistema especialista gera um diagnóstico a partir de fatos e regras com o auxílio de funções, sendo estruturado em módulos. O processamento desse programa acaba gerando resultado semelhante a uma análise de um profissional especialista.

Os sinais dos relés de proteção gerados a partir da atuação da proteção e os dados cadastrais desses relés, existentes em arquivos texto XML, constituem parte dos fatos utilizados no processamento. As regras são a formalização do conhecimento dos especialistas, elas são utilizadas na avaliação das condições de disparo dos relés de proteção.

A estrutura do conhecimento utilizado no código do sistema especialista é constituída por módulos onde estão agrupadas as regras para cada função de proteção. No sistema especialista foram contempladas, na forma de módulos, as seguintes funções de proteção:

- Sobrecorrente instantâneo de fase (50);
- Sobrecorrente temporizado de fase (51);
- Sobrecorrente instantâneo de neutro (50N);
- Sobrecorrente temporizado de neutro (51N);
- Sobrecorrente temporizado de terra (51GS);
- Religamento (79);
- Bloqueio do alimentador (86A);
- Bloqueio da retaguarda (86T);
- Diferencial (87).

#### G. Especificação técnica do sistema

A seguir é apresentada toda a especificação do sistema IAPROT, e seus módulos constituintes.

Para que o sistema especialista pudesse ser testado, foi montada uma giga contendo relés de proteção selecionados segundo sua funcionalidade e protocolos de comunicação mais utilizados na concessionária, que foi denominado de Protlab. O PROTALAB está acondicionado em racks padrão de 19 polegadas, e contém os relés de proteção indicados na tabela I.

Conforme pode ser observado nesta tabela, foram escolhidos os equipamentos mais usuais em subestações de distribuição, de modo a podermos testar diferentes arranjos, além de apresentar uma composição diversificada de relés de proteção, com diferentes modelos, fabricantes, tecnologias e protocolos de comunicação.

Tabela III. Relés de proteção.

Relé do fabricante	Modelo	Tecnologia	Protocolo de comunicação
GE	F35	Digital	Modbus
ZIV	8IRV	Digital	Procome
ABB	DPU 2000R	Digital	DNP 3.0
GE	D60	Digital	IEC 61850
Areva	P145	Digital	Courier
SEL	451	Digital	DNP 3.0
Siemens	SJ64	Digital	IEC 61850
Siemens	7UT612	Digital	IEC 60870-5-103
GE	BDD	Eletromecânico	-
GE	IAC	Eletromecânico	-
WH	-	Eletromecânico	-

A comunicação de dados com os relés é conduzida por um servidor OPC, que é um software dotado de interfaces padronizadas que possibilitam de um lado a utilização de drivers de comunicação de dados que implementam diferentes protocolos, bem como fornecer uma interface comum de acesso, que independente do tipo do relé, protocolo de comunicação de dados e do fabricante do driver. Essa interface de padronização é normatizada pela OPC Foundation [11], que zela pelo seu desenvolvimento e sua consistência.

A interligação física existente entre os diferentes relés de proteção ao servidor OPC é feita através de duas redes distintas, uma rede Ethernet e uma rede serial com o protocolo

RS485, conforme o canal físico de comunicação de dados disponibilizado pelo equipamento de proteção.

O servidor OPC utilizado no Protlab foi o IOserver versão 1.0.16.33 BETA, da empresa Australiana IOSERVER. Na configuração foi adotado o método de chamada remota Callback, que possibilita ativar o sistema especialista automaticamente no caso de ocorrência de comando de trip por um relé.

No caso dos relés eletromecânicos foi utilizado o IED MICOM M872 Bitronics, do fabricante Areva, para a extração das informações de tensão, corrente e trip, com estampa de tempo sincronizada por equipamentos de GPS.

Na figura 1 está apresentado o diagrama da rede de comunicação dos relés utilizados no sistema. O servidor OPC utiliza a rede para a obtenção dos dados nos relés e no simulador de disjuntor.

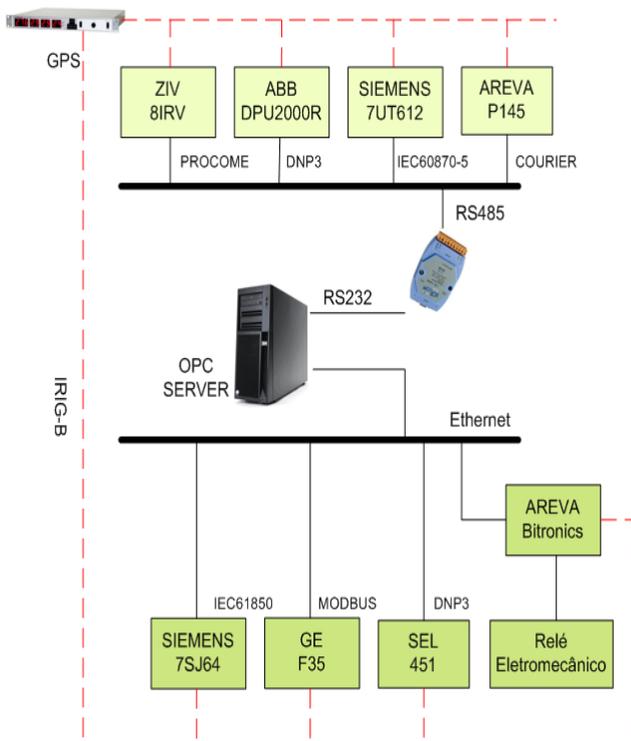


Figura 1. Interligação do Servidor OPC aos relés digitais e eletromecânicos.

Outro componente importante para os testes com o sistema é Simulador de Disjuntor. Ele foi desenvolvido especificamente para simular o comportamento dos disjuntores principal e retaguarda de um esquema de proteção, possibilitando a simulação das operações de abertura e fechamento, bem como a análise do seu comportamento em situação de anomalia forçada pelo usuário. Em seu desenvolvimento foi utilizada a lógica proposicional.

A arquitetura do programa Simulador de Disjuntor é basicamente composta pelas interfaces que lidam com o disjuntor principal e o disjuntor de retaguarda. Mais especificamente as interfaces são:

- Interface gráfica simuladora das chaves permite a interação com um operador, possibilitando realizar simulações comportamentais aplicando-se diversas anomalias internas, inclusive parâmetros de tempo

de resposta. Basicamente são telas específicas para o controle e para a simulação de falhas;

- Interface gráfica do circuito elétrico e lógico, que permite ao operador observar o estado do circuito dos disjuntores. A simulação também é visualizada por meio de diagramas elétricos;
- Interface de sinais digitais bi-direcionais, capacitando-o a responder aos comandos de trip e religamento para os relés de proteção.

Na figura 2 pode ser visualizada a tela de simulação das chaves de comando do programa simulador do disjuntor, enquanto a figura 3 apresenta a tela de simulação da falha e sinalização dos alarmes.

O simulador pode ser configurado e operado manualmente ou operar automaticamente disponibilizando as informações da sua atuação para o servidor OPC.

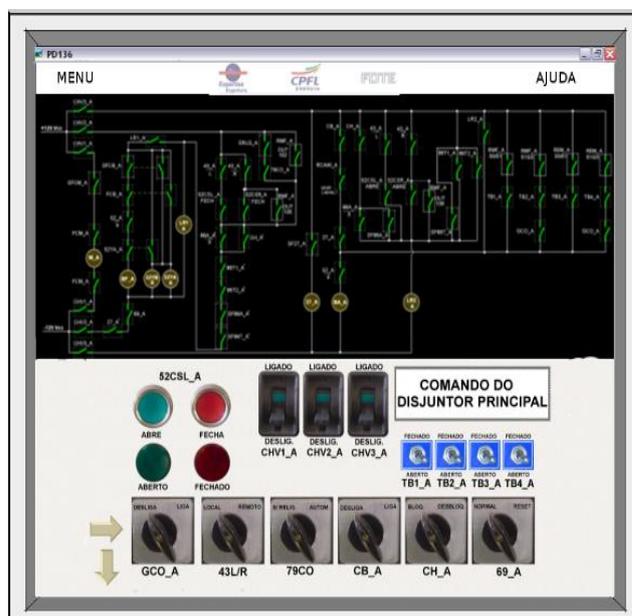


Figura 2. Simulador do disjuntor Diagrama e Chaves de Comando.



Figura 3. Simulador do disjuntor – Sinalização e Alarmes.

Outra interface utilizada pelo simulador de disjuntor é apresentada na figura 4, nela é possível definir alguns tempos de operação.

Através do Simulador de Disjuntor são possíveis as seguintes simulações de defeitos nos disjuntores: principal e de retaguarda, falha no motor, falha no carregamento de mola, falha no relé auxiliar LR, falha do relé anti-pumping, blo-

queio de transformador, falha relé sub-tensão, queima da bobina de abertura BA\_R, queima da bobina de fechamento BF\_R, abertura remota, fechamento remoto.



Figura 4. Tela para parametrização de tempos de operação

Para realizar uma simulação é necessário configurar o Simulador de Disjuntor, para isso devem ser definidos os tempos de operação, as posições dos botões e chaves, dessa forma a quantidade de configurações possíveis é grande.

O resultado dessas combinações refletirá na tela com o desenho do circuito elétrico e no sistema especialista com os sinais que serão disponibilizados via uma interface digital para o servidor OPC, e deste para o cliente OPC e por fim na execução do sistema especialista na simulação da atuação da proteção.

Cabe ressaltar, que em sua operação, o Simulador do Disjuntor ao receber um sinal de trip proveniente de um relé de proteção, resolve as equações lógicas que envolvem o funcionamento dos componentes internos do equipamento, e reproduz analogicamente os níveis de tensão dos sinais 52a e 52b do disjuntor. Esses sinais são utilizados, juntamente com as informações dos relés, nas regras do sistema especialista para o diagnóstico da atuação da proteção.

#### H. Atuação do Sistema desenvolvido

O sistema especialista desenvolvido está inserido na arquitetura do sistema denominado IAPROT.

A explicação da atuação do sistema como um todo incluindo o programa de diagnóstico (sistema especialista) pode ser explicado com o auxílio de um diagrama de fluxo de dados apresentado na figura 5.

O diagrama da figura 5 é atemporal e não indica um início de operação. Para efeito de entendimento o servidor OPC fica constantemente efetuando a varredura dos relés de proteção. Ao detectar um comando de trip emitido por algum relé de proteção, dispara via call back a Interface de Atuação que obtêm dados do cadastro de relés para enviá-los ao sistema especialista. O sistema especialista ao ser executado gera um diagnóstico. Entre as informações que circulam no sistema estão os dados cadastrais dos relés em XML, os fatos gerados pela interface de atuação, as funções e regras utilizadas pelo sistema especialista, e o diagnóstico gerado.

No que tange ao sistema especialista ele opera, de forma mais detalhada, da seguinte forma:

- Tendo conhecimento do relé envolvido na atuação da proteção;
- A base de conhecimento que será utilizada começa a ser montada;
- Primeiramente o sistema recebe os fatos (parâmetros) de curto-circuito, tolerâncias para cálculos, inicialização de variáveis, flags e os desvios operacionais. Esses fatos não se referem ainda ao relé de atuação;
- Em seguida são recebidos os fatos referentes aos relés, sendo que o relé envolvido na atuação de proteção é o que possui informações relevantes para o sistema especialista. Na prática somente serão utilizados aqueles que tiverem conteúdo significativo, a seleção feita pela própria ferramenta CLIPS;
- Na seqüência são recebidas as funções que serão utilizadas no processamento, envolvendo funções: específicas de cada módulo, cálculo de sobrecorrente, fatores, curto circuito, números complexos, dentre outras;

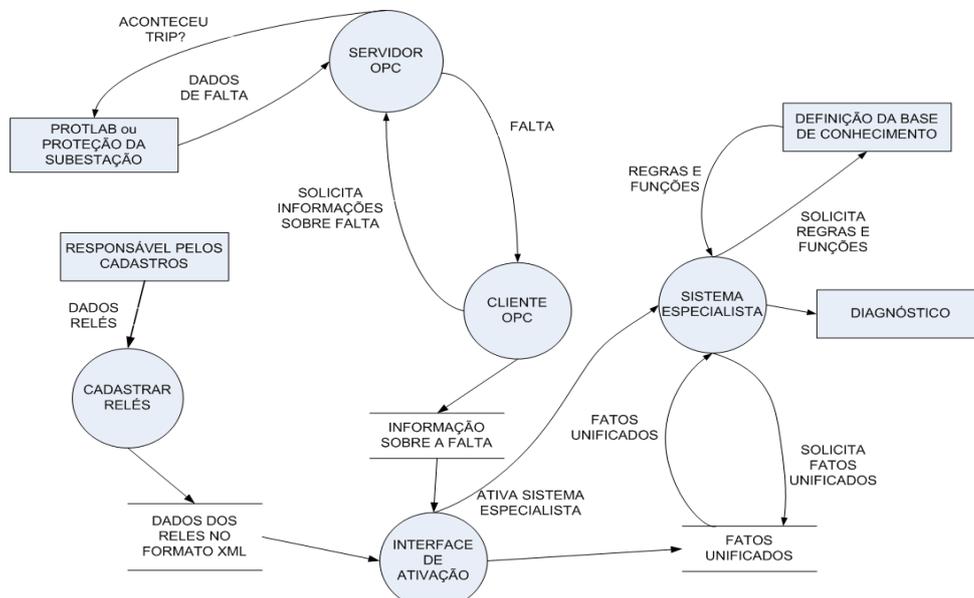


Figura 5. Diagrama de fluxo de dados

- Em seguida são recebidas as regras de definição de módulos, regras de chamada e gravação de arquivos e regras de normalização das variáveis de operação, tempo e de sobrecorrente;
- Por fim são recebidas as regras de todos os tipos de relé envolvidos;
- Após receber a base de conhecimento o sistema especialista filtrará essas informações de forma a tratar somente aquelas que são relevantes para o processamento de algoritmos específicos;
- Inicializa-se o processamento propriamente dito, no qual será realizada a inferência, montando o diagnóstico;
- Apresentação do diagnóstico e finalização do processamento.

Cabe ressaltar que durante a inferência e dependendo do relé alguns problemas podem ser considerados: a identificação do tipo do relé, aplicação de regras específicas, a realização de cálculo de curto-circuito, a análise do curto-circuito e a aplicação das regras do disjuntor.

### III. RESULTADOS

Após o desenvolvimento físico e lógico estar completado foi realizado no sistema uma bateria de testes. Com o uso do PROTLAB e uma maleta de testes de relés de proteção, foi possível simular o desempenho do sistema especialista para diferentes tipos e condições de faltas, nos vários relés de proteção.

A título de ilustração, a atuação da proteção gerada pelo sistema especialista com relação à simulação de uma situação de curto-circuito fase-terra, com o disjuntor principal extraído, sensibilizando a função de sobrecorrente de um relé digital, pode apresentar, por exemplo, um diagnóstico indicando que:

- O disjuntor está extraído e não pode operar;
- O relé de sobrecorrente instantâneo da fase atuou de acordo com seu ajuste de *pickup*;
- Ocorreu falta fase terra.

A seguir é discutida a análise de desempenho do sistema especialista.

#### A. Análise de desempenho

Foram realizados testes com diferentes tipos de faltas no alimentador, com a utilização de diferentes tipos de relés de proteção com diferentes tipos de protocolos. Aqui estão apresentados como amostragem seis tipos de condições de teste, de um conjunto de 55 possibilidades, para a avaliação de desempenho do sistema especialista.

As seis faltas simuladas foram:

1. Atuação do relé auxiliar de bloqueio no vão do alimentador, devido à atuação do relé diferencial, em consequência de um curto-circuito na sua região de proteção;
2. Atuação do relé de sobrecorrente instantâneo de fase (PIOC), devido a um curto-circuito bifásico na fase A e B no vão de retaguarda;

3. Atuação do relé de sobrecorrente temporizado de fase (PTOC), devido a um curto-circuito monofásico na fase A no vão de retaguarda;
4. Curto circuito monofásico na fase A no vão do alimentador com um religamento automático;
5. Curto circuito monofásico na fase A no vão do alimentador com dois religamentos com bloqueio do relé de religamento;
6. Atuação do disjuntor de retaguarda devido a uma falha do disjuntor principal em um curto circuito monofásico.

As falhas que ocorreram no caso 3 foram de dois tipos. A primeira falha está relacionada ao protocolo Modbus, ocorreu uma falha devido ao protocolo não fornecer uma estampa de tempo ao servidor OPC que faz a atuação a cada 500 ms. Assim, não foi possível obter o intervalo de tempo com precisão suficiente entre a partida e a operação do elemento de sobrecorrente temporizado. O resultado disso foi uma inconsistência no diagnóstico do sistema especialista.

Outra falha no diagnóstico ocorreu também no caso 3 com a utilização do protocolo DNP3 operando com o relé digital, tendo a estampa de tempo associada às variáveis. Neste caso não foi possível identificar a sua origem. Sendo que para os demais fabricantes com o mesmo protocolo esta característica não é apresentada. Assim, ocorreu uma leitura de dados inconsistentes e conseqüentemente gerou um diagnóstico errado.

Todos os demais testes resultaram em diagnósticos esperados.

### IV. CONCLUSÕES

Este artigo apresentou o desenvolvimento e aplicação de um sistema especialista integrado a um equipamento, denominado IAPROT, visando à obtenção de diagnóstico da atuação da proteção em subestações de distribuição. Objetivando o sistema especialista foram desenvolvidas árvores de decisões com diagramas de seqüência definidos pelo UML, levantados fatos, regras e funções e realizada a sua compilação na forma de regras de produção.

O diagnóstico obtido com base nos conhecimentos de especialistas, também identifica erros nos ajustes ou em parâmetros dos relés de proteção. Além disso, ocorre a diminuição no tempo de análise dos eventos por parte do profissional de proteção.

Como consequência desse desenvolvimento foi observado que o sistema especialista analisou corretamente a maioria dos testes, mas não está preparado para interpretar e analisar de forma adequada uma classe de problemas gerados pela forma de operação, e atualização das variáveis internas de alguns relés. Também foi notada a geração de diagnósticos errados resultantes de uma classe de problemas relacionados às limitações de alguns protocolos.

Assim em desenvolvimentos futuros, além da ampliação dos tipos de relés testados, é possível tratar os problemas citados melhorando a forma de aquisição de fatos que alimentam o sistema especialista. Com a finalidade de melhorar o desempenho para a obtenção de um diagnóstico, é pos-

sível a utilização das estruturas desenvolvidas na aplicação com o sistema especialista em programas de computador tradicionais em outra linguagem, por exemplo, em “C”.

## V. AGRADECIMENTOS

A Companhia Paulista de Força e Luz - CPFL pelo suporte financeiro e também pelo apoio técnico através de sua equipe de profissionais.

A Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL pela aprovação deste projeto no seu programa de pesquisa e desenvolvimento.

## VI. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] G. F. Luger, “Inteligência Artificial – estruturas e estratégias para a solução de problemas complexos”, tradução 4ª edição, Porto Alegre: Bookman, 2004, p. 23.
- [2] S. Russell e P. Norvig, “Inteligência Artificial”, tradução 2ª edição, Rio de Janeiro: Editora Campus, 2004, pp. 4-7.
- [3] M. Kezunovic, X. Luo. “Automated Analysis of Protective Relay Data”, 18th International Conference on Electricity Distribution, CIRED2005, Session No 3, June. 6-9, 2005.
- [4] J. Simo, M. Martinez, F. Morant, A. Crespo; “Expert system for control purpose based on CLIPS” Electrotechnical Conference, 1994. Proceedings., 7th Mediterranean
- [5] P. Baroni, G. Lamperti, P. Pogliano, and M. Zanella, “Diagnosis of a class of distributed discrete-event systems,” IEEE Trans. Syst., Man, Cybern A, vol. 30, pp. 731–752, Nov. 2000.
- [6] G. M. Ribeiro, A. V. e Godoy. “Impacto da automação no projeto de subestações”. In: Seminário nacional de produção e transmissão de energia, Belém: 1997.
- [7] M. V. J. Dias, R. D. “An integrated approach to substation automation problem based on multifunctional Power Tech Proceedings protective relays”, Power Tech Proceedings-IEER Porto, 2001, 6p.
- [8] M. Kezunovic, T. Djokic, T. Kostic “Automated Monitoring and Control Using New Data Integration Paradigm”, 38th Annual Hawaii International Conference on Systems Science, Waikoloa, HI, Jan. 5-8, 2005.
- [9] L. Andersson, C. Brunner, F. Engler. “Substation automation based on IEC 61850 with new process-close technologies”, Power Tech Conference Proceedings-IEEE, 2004, 4p.
- [10] A. P. Apostolov. “Distributed protection, control and recording in IEC 61850 based substation automation systems”, 8th IEE International Conference on, 2004, 3p.
- [11] OPC FOUNDATION, “OPC Data Access Custom Interface Specification”, version 3.0, march 4, 2003.