

**ANÁLISE AUTOMÁTICA DE RESULTADOS DE TESTES DE MODELO
REALIZADOS EM PROTEÇÕES DE LINHAS DE TRANSMISSÃO
UTILIZANDO SIMULADOR EM TEMPO REAL (RTDS)**

JÚLIO CÉSAR BATISTA

Monografia submetida à Comissão Coordenadora do Curso de Especialização em Engenharia de Sistemas Elétricos de Potência – CESEP, Ênfase: Supervisão, Controle e Proteção de SEP, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do certificado da Especialização.

Aprovada em ____ de _____ de 2012

**Clever Sebastião Pereira Filho - Dr.
Supervisor**

**Silvério Visacro Filho - Dr.
Coordenador do CESEP**

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 RELEVÂNCIA E CONTEXTO DA INVESTIGAÇÃO.....	1
1.2 OBJETIVO E METODOLOGIA DE DESENVOLVIMENTO	2
1.3 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO.....	3
 2. TESTES DE MODELO EM RELÉS DE PROTEÇÃO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO	 4
2.1 PROJETO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO.....	4
2.2 MODELAGEM E REDUÇÃO DE UM SISTEMA ELÉTRICO.....	6
2.3 EXECUÇÃO DE SIMULAÇÕES	7
2.4 ANÁLISE DE RESULTADOS	8
 3. VARIÁVEIS DE ENTRADA E CRITÉRIOS DE AVALIAÇÃO	 9
3.1 INTRODUÇÃO.....	9
3.2 PROTEÇÃO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO	9
3.2.1 <i>Relés de Proteção</i>	9
3.2.2 <i>Funções de Proteção</i>	10
3.2.2.1 <i>Proteção de Distância</i>	11
3.2.2.2 <i>Teleproteção</i>	13
3.2.2.3 <i>Sobrecorrente Direcional de Neutro</i>	16
3.2.2.4 <i>Energização sob Falta</i>	17
3.2.2.5 <i>Bloqueio por Oscilação de Potência e Perda de Sincronismo</i>	17
3.2.2.6 <i>Sobretensão</i>	19
3.2.2.7 <i>Religamento Automático</i>	19
3.2.2.8 <i>Check de Sincronismo</i>	20
3.2.2.9 <i>Falha de Fusível</i>	20
3.2.2.10 <i>Falha de Disjuntor</i>	21
3.2.2.11 <i>Proteção Diferencial de Linha</i>	23
3.3 VARIÁVEIS DE ENTRADA	24
3.4 CRITÉRIOS DE AVALIAÇÃO – FALTAS INTERNAS EM UMA LINHA DE TRANSMISSÃO COM RELIGAMENTO AUTOMÁTICO SATISFATÓRIO	27
3.3.1 <i>Avaliação do Tempo de Eliminação de Falta e Abertura Correta do Disjuntor</i> ...	27
3.3.2 <i>Avaliação das Respostas das Funções de Proteção</i>	29
3.3.3 <i>Avaliação do Religamento Automático</i>	30

4. SOFTWARE DE ANÁLISE DE RESULTADOS	32
4.1 APRESENTAÇÃO	32
4.2 TELA INICIAL	34
4.3 LEITURA DA BASE DE DADOS GERADA PELO RTDS	35
4.4 EDIÇÃO DAS LÓGICAS DE AVALIAÇÃO DAS SIMULAÇÕES.....	36
4.5 VISUALIZAÇÃO DOS RESULTADOS DA ANÁLISE AUTOMÁTICA.....	37
 5. CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE CONTINUIDADE	 39
5.1 CONCLUSÕES.....	39
5.2 PROPOSTAS DE CONTINUIDADE	40
 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	 42

RESUMO

O Simulador Digital em Tempo Real (Real Time Digital Simulator – RTDSTM) é uma ferramenta avançada utilizada por fabricantes e empresas do setor elétrico para simulação de Sistemas Elétricos de Potência (SEP), sendo a sua principal aplicação a realização de ensaios de modelos em equipamentos de proteção e controle. Em um único ensaio de modelo são simuladas centenas de falhas e condições especiais de um determinado SEP, o que gera um grande volume de dados a serem analisados. Com os métodos atuais de análises de resultados podem-se levar semanas até obter um parecer final sobre o desempenho de um equipamento de proteção. Com o objetivo de reduzir o tempo e minimizar os erros no processo de avaliação das simulações, este trabalho propõe o estabelecimento de critérios de avaliação que serão implementados em um software específico para este fim. O foco serão os ensaios em modelo de proteções de linhas de transmissão. Serão identificadas as variáveis de entrada do programa com a apresentação de um caso exemplo de avaliação lógica de simulações. Ao final será apresentada a estrutura prevista para o software, descrevendo suas principais funcionalidades e interfaces previstas.

ABSTRACT

The Real Time Digital Simulator (RTDSTM) is an advanced tool used by manufactures and electricity companies for the Power System Simulation. The main application of RTDS is in model-based testing of protection and control devices. In one model-based testing are simulated hundreds of failures and special conditions of a given Power System, which generates a large volume of data to be analyzed. The current methods of analysis can take weeks to get a final conclusion on the protection device's performance. In order to reduce time and minimize errors of the simulation evaluation process, this work proposes the creation of evaluation criterions that will be implemented in specific software for this purpose. The focus will be power lines protection model-based testing. The program input variables will be identified with the presentation of an example case of simulations logical evaluation. At the end it will be presented the predicted structure for the software, describing their main features and provided interfaces.

1 Introdução

1.1 Relevância e Contexto da Investigação

A melhoria nos índices de desempenho e confiabilidade dos equipamentos do Sistema Elétrico de Potência é constantemente objeto de estudo por parte das concessionárias e agentes do setor elétrico. No Brasil a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) prevê o incentivo ou penalidades de acordo com o índice de desempenho das chamadas Funções de Transmissão ou FT¹ das concessionárias [AQUINO e VALE, 2009]. Tais índices estão diretamente relacionados com os desligamentos programados e não programados das FT's, sendo este último originado principalmente por atuações dos sistemas de proteção. Logo, o bom funcionamento dos dispositivos de proteção é fundamental para que as empresas do setor elétrico garantam melhores índices de disponibilidade dos equipamentos de suas instalações.

A utilização dos chamados Simuladores Digitais em Tempo Real (RTDSTM) para a modelagem de um SEP é considerado atualmente o recurso mais completo para a avaliação dos dispositivos de proteção objetivando o melhor desempenho de sua aplicação para o equipamento protegido. Porém, este recurso é bastante oneroso para as concessionárias devido ao alto custo dos simuladores e da engenharia necessária para a modelagem do sistema, execução das simulações e análise de resultados. No Brasil, a utilização do RTDS não é uma prática usual devido ao seu elevado custo e também aos poucos simuladores disponíveis em território nacional.

No sentido de tornar mais acessível a utilização do RTDS para teste de modelos de sistemas de proteção no setor elétrico brasileiro foi criado um grupo de trabalho composto por especialistas que trabalham na área. No contexto deste grupo, encontra-se o projeto de pesquisa intitulado *Desenvolvimento de metodologia para busca das condições ideais de aplicação de*

¹ Funções de Transmissão ou FT: refere-se ao conjunto de instalações funcionalmente dependentes, considerado de forma solitária para fins de apuração da prestação de serviços de transmissão, compreendendo o equipamento principal e os complementares. Os tipos de FT são: Linha de Transmissão, Transformação, Controle Reativo e Módulo Geral [AQUINO e VALE, 2009].

equipamentos de proteção e controle no sistema elétrico elaborado em parceria entre a empresa CEMIG Geração e Transmissão LTDA e a UFMG/LRC².

Esta monografia contribui para os desenvolvimentos realizados no grupo de trabalho, onde o autor atua como voluntário, mais especificamente no tema “Análise Automática de Resultados de Testes de Modelo Realizados em Proteção de Linhas de Transmissão Utilizando Simulador em Tempo Real (RTDS)”.

1.2 Objetivo e Metodologia de Desenvolvimento

Uma das metas do projeto de P&D conduzido pelo grupo de trabalho é automatizar as três etapas básicas de um teste de modelo de proteções de linhas de transmissão e geradores que são respectivamente: A) Modelagem e Redução do Sistema; B) Execução de Simulações e C) Análise de Resultados.

Primeiramente, será realizada uma descrição sucinta das três etapas básicas do teste de modelo de proteção de linha de transmissão para entendimento do projeto como um todo.

O trabalho proposto pelo autor desta monografia está relacionado com a terceira etapa do P&D, Análise de Resultados, especificamente a definição de critérios para a avaliação individual das simulações realizadas em proteções de linhas de transmissão que serão implementadas no Software de Análise de Resultados.

Para tal é necessária à determinação das variáveis de entrada do software lidas a partir de uma base de dados exportada pelo RTDS. Tal base de dados é gerada a partir de simulações de defeitos em linhas de transmissão com requisitos da Rede Básica³.

Será definida a estrutura base do software de Análise de Resultados, como apresentação, funcionalidades e interfaces previstas.

A partir do trabalho desenvolvido chega-se às conclusões e às propostas para continuidade do desenvolvimento do programa para outros tipos de casos e equipamentos.

² UFMG/LRC: Núcleo de Desenvolvimento Científico e Tecnológico em Descargas Atmosféricas da Universidade Federal de Minas Gerais

³ Rede Básica: Instalações elétricas e equipamentos que compõem o Sistema Interligado Nacional

1.3 Organização do texto

O texto da presente monografia foi preparado com o intuito de ser objetivo e apresentar uma sequência lógica do trabalho realizado, sendo dividido em cinco capítulos, incluindo o capítulo de Introdução.

O **Capítulo 2** consiste na apresentação do projeto de pesquisa e desenvolvimento: Desenvolvimento de metodologia para busca das condições ideais de aplicação de equipamentos de proteção e controle no sistema elétrico.

Os **Capítulos 3 e 4** apresentam a contribuição do autor desta monografia para o projeto de Pesquisa e Desenvolvimento.

No **Capítulo 3** é realizada uma revisão sobre a filosofia e princípios das proteções de uma linha de transmissão. A partir de tal revisão serão identificadas as variáveis de entrada avaliadas no Software de Análise de Resultados para um ensaio de modelo de Linhas de Transmissão. Será apresentado um caso exemplo para avaliação (falhas internas na linha de transmissão com religamento automático satisfatório) no qual serão abordados os critérios e as lógicas utilizadas no programa.

O **Capítulo 4** apresenta o Software de Análise de Resultados, descrevendo as funcionalidades e estrutura previstas para este programa.

As conclusões finais e proposta de continuidade são abordadas no **Capítulo 5**.

Ao final do texto são apresentadas as **Referências Bibliográficas** utilizadas.

2 Testes de Modelo em Relés de Proteção de Linhas de Transmissão

2.1 Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento

O Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento, com o título *Desenvolvimento de Metodologia para Busca das Condições Ideais de Aplicação de Equipamentos de Proteção e Controle no Sistema Elétrico* nasceu com o objetivo de estabelecer um protocolo de testes de aceitação e verificação do desempenho de relés de proteção de tecnologia digital, atualmente disponíveis no mercado.

A equipe do projeto de pesquisa é constituído por profissionais da CEMIG e do PROTLab⁴, com grande experiência no setor elétrico nacional. Além disto, conta com a participação de voluntários e bolsistas de cursos de graduação e pós-graduação da UFMG.

A necessidade do projeto surgiu devido à crescente demanda pelo aumento da confiabilidade e desempenho dos sistemas de proteção de equipamentos da Rede Básica ao mesmo tempo em que tais sistemas de proteção tornam-se cada vez mais complexos. Essa complexidade é consequência do próprio avanço da tecnologia dos relés de proteção que passam a executar um número maior de funções em um único dispositivo.

Para os testes de aceitação e verificação do desempenho de relés de proteção digital, também conhecidos como *testes de modelo*, o projeto de P&D adquiriu, com os recursos próprios, uma estrutura completa de laboratório contendo computadores, relés de proteção e um simulador completo em tempo real de última tecnologia da RTDS Technologies, contendo o hardware de geração do sinal (Figura 2.1), amplificadores, placas de interface e software de

⁴ PROTLab - Laboratório de Proteção Digital de Sistemas Elétricos – UFMG/LRC

simulação RSCAD⁵. O conjunto software e hardware do simulador serão tratados nesta monografia simplesmente como RTDS.



Figura 2.1 - Hardware Simulador RTDS [RTDS TECHNOLOGIES, 2012]

Basicamente em um teste de modelo utilizando o RTDS, um determinado sistema elétrico de potência é modelado considerando as principais características elétricas dos equipamentos que o compõem. São simulados o fluxo de potência e condições de curto-circuito para validação do modelo adotado.

A partir de um modelo são executadas simulações de casos de falhas e condições especiais de operação. Durante a execução das simulações o RTDS envia fisicamente para as entradas analógicas dos relés de proteção valores de correntes e tensões secundárias calculadas pelo seu software em tempo real de acordo com o ponto de medição e fenômeno simulado. A resposta dos relés de proteção é monitorada e registrada simultaneamente pelo RTDS.

⁵ RSCAD: Conjunto de softwares do RTDS para simulações, controle e modificação de parâmetros do sistema durante a simulação, aquisição de dados, análise de resultados e biblioteca de componentes elétricos.

As etapas de modelagem do sistema e análise de resultados são praticamente manuais exigindo um intenso trabalho de engenharia em cada uma destas etapas. Atualmente um ensaio de modelo leva em média de 3 a 4 meses entre a coleta dos dados para modelagem do sistema e a emissão do parecer final sobre o resultado das simulações.

No sentido de proporcionar uma redução do custo e do tempo empregado para a realização de um teste de modelo, o projeto propõe a automatização das três etapas básicas deste tipo de ensaio: a modelagem e redução do sistema, a realização das simulações e a análise de resultados. Nos tópicos seguintes será abordada cada uma destas etapas objeto de estudo do projeto de P&D.

2.2 Modelagem e Redução de um Sistema Elétrico

Esta etapa do projeto de pesquisa consiste em preparar automaticamente um modelo, no software RSCAD, de um subsistema elétrico no entorno do equipamento a ser estudado (uma linha de transmissão, por exemplo) a partir de um sistema elétrico completo pré-modelado nos softwares de cálculo de curto-circuito ASPEN OneLiner⁶ e de fluxo de potência ANAREDE⁷ conhecidos e utilizados no setor elétrico brasileiro.

A preparação automática do modelo reduzido é realizada por um software desenvolvido pelo grupo de trabalho do projeto de P&D. Este software acessa as bases de dados de cada um dos softwares de curto-circuito e fluxo de potência, executa o equivalente elétrico da rede no entorno do equipamento desejado e transfere o resultado para o software RSCAD, montando automaticamente o modelo reduzido neste software, como por exemplo, o modelo apresentado na Figura 2.2. Nesta figura está apresentado um subsistema elétrico de potência constituído de linhas de transmissão e subestações em 230 kV. No entorno do subsistema estão representadas as fontes equivalente do modelo reduzido. Os pontos identificados como “Fn” representam os locais de simulação dos curtos-circuitos. As impedâncias das fontes equivalentes e das linhas de transmissão são indicadas próximas a estes componentes.

A partir do modelo reduzido são executadas simulações de curto-circuito e fluxo de potência no software RSCAD. O resultado obtido é comparado com os casos completos modelados no ASPEN e ANAREDE. A comparação é apresentada para o usuário e deve estar dentro dos limites de tolerância pré-estabelecidos no próprio programa.

⁶ ASPEN OneLiner: Software de Cálculo de Curto-circuito de SEP

⁷ ANAREDE: Software de Cálculo de Fluxo de Potência e Equivalente de Redes

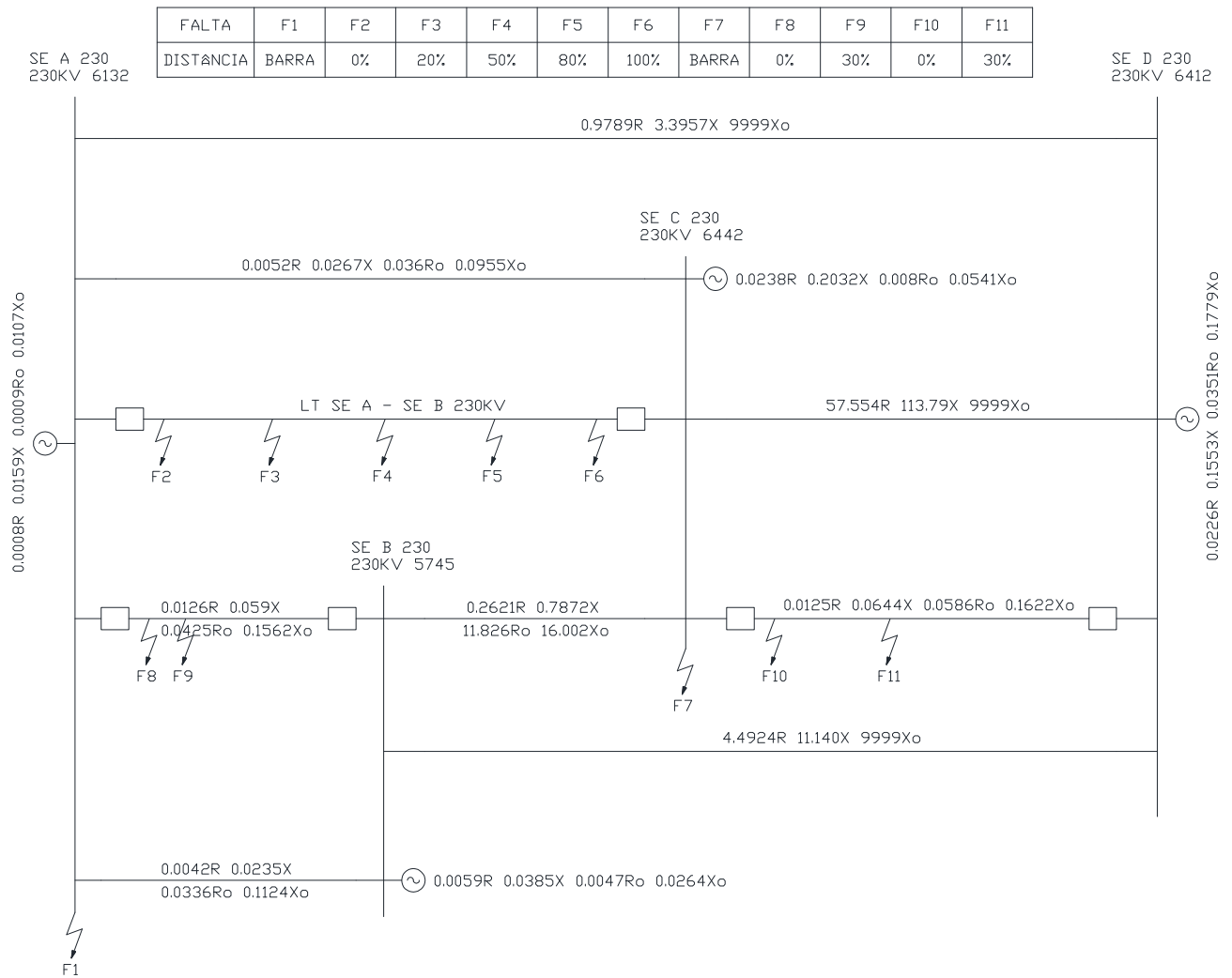


Figura 2.2 - Exemplo de Sistema Elétrico Reduzido [ELETROSUL CENTRAIS ELÉTRICAS, 2006]

2.3 Execução de Simulações

A execução das simulações é realizada manualmente ou automaticamente por meio de scripts do RSCAD utilizando como referência um roteiro de falhas e condições especiais definidas pelo usuário, conforme exemplo apresentado na Tabela 2.1.

O projeto de pesquisa tem como uma das metas definir um roteiro padronizado para tais simulações de acordo com o equipamento a ser avaliado, inicialmente para linhas de transmissão e unidades geradoras.

Neste roteiro deverão ser especificadas basicamente as condições e o tipo de falta, sua localização, tempo de duração, etc. Poderá incluir situações especiais de operação do equipamento a ser protegido nas quais não é desejada a operação dos relés de proteção, como por exemplo, falhas externas, condições de sobrecarga, oscilação de potência, etc.

A partir do roteiro padronizado é possível programar uma sequência automatizada no RSCAD para execução das simulações e armazenamento dos dados obtidos a partir dos relés de proteção e da própria simulação.

Tabela 2.1 - Exemplo de Roteiro de Falhas relacionado com o sistema reduzido da Figura 2.2 [ELETROSUL CENTRAIS ELÉTRICAS, 2006]

Caso Nº	Posição da Falta	Tipo de Falta	Resistência de Falta entre Fases (ohm)	Resistência de Falta Fase Terra (ohm)	Ângulo de Incidência da Falta
1	F2	A-G			0
2	F2	A-B			0
3	F2	A-B-G			0
4	F2	A-B-C-G			0
5	F3	A-G			30
6	F3	A-B			30
7	F3	A-B-G			30
8	F3	A-B-C-G			30
9	F4	B-G			60
10	F4	B-C			60
11	F4	B-C-G			60
12	F4	A-B-C-G			60
13	F5	B-G			90
14	F5	B-C			90
15	F5	B-C-G			90
16	F5	B-C-A-G			90
17	F6	B-G			0
18	F6	B-C			0
19	F6	B-C-G			0
20	F6	B-C-A-G			0

2.4 Análise de Resultados

A última etapa de um teste de modelo é a análise dos resultados registrados pelo RTDS. Normalmente estas informações estão disponíveis sob a forma de uma base de dados pré-configurada no RTDS e sob a forma de oscilografias das formas de onda das correntes e tensões aplicadas nos relés de proteção em conjunto com informações binárias das respostas destes relés e também de equipamentos simulados no RTDS.

Uma das metas do projeto de P&D é proporcionar uma análise automática da base de dados gerada pelo RTDS por meio de um software que avalia pontualmente cada simulação realizada. A avaliação é executada a partir critérios programados no software por meio de lógicas definidas pelo usuário. O resultado é apresentado em uma planilha de fácil visualização das simulações aprovadas e das simulações rejeitadas, sendo que neste último caso o programa deverá indicar ao usuário o motivo da desqualificação do ensaio.

3 Variáveis de Entrada e Critérios de Avaliação

3.1 Introdução

A contribuição do autor desta monografia com o projeto de pesquisa e desenvolvimento inicia com a definição e descrição das *Variáveis de Entrada* e dos critérios de avaliação de um ensaio em modelo de proteção de linhas de transmissão. Tais critérios serão implementados posteriormente em um programa computacional cuja estrutura será apresentada no Capítulo 4.

Antes de definir e conceituar cada uma das *Variáveis de Entrada* é necessário uma breve revisão sobre a proteção de linhas de transmissão, o que irá permitir o entendimento dos termos utilizados para descrição de tais elementos.

3.2 Proteção de Linhas de Transmissão

3.2.1 Relés de Proteção

Os atuais sistemas de proteção de uma linha de transmissão são constituídos principalmente por relés de proteção de tecnologia digital também conhecidos como IED's (Intelligent Electronic Devices).

A estrutura de hardware de um IED, ilustrada na Figura 3.1, é composta basicamente de fonte de alimentação, entradas analógicas de tensão e corrente e suas respectivas interfaces analógico-digitais, entradas e saídas digitais, memória, módulo de processamento ou CPU, portas de comunicação e Interface Homem Máquina (IHM).

Em um IED estão implementados algoritmos de filtragem de sinais, algoritmos das funções de proteção e controle e aplicativos internos que são executados sob a plataforma de um sistema operacional em tempo real.

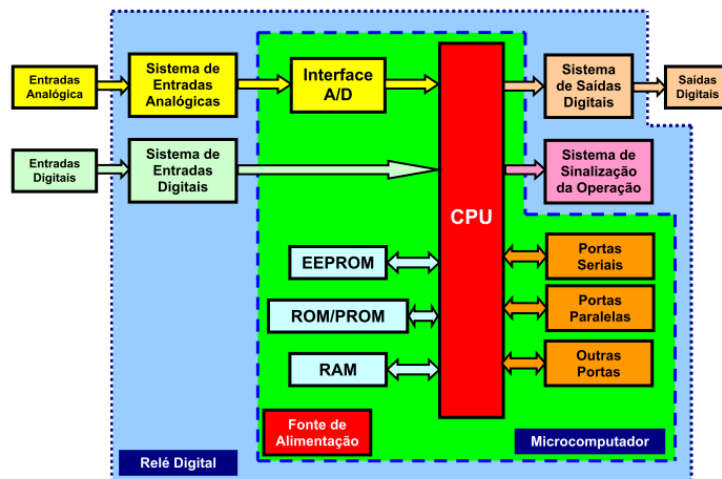


Figura 3.1 - Diagrama Funcional de um Relé Digital [PEREIRA, 2011]

Entre os aplicativos internos disponíveis em um relé digital destacam-se o editor de lógicas de proteção e controle, registrador de oscilografias, configurador da IHM, aplicativos de parametrização das funções de proteção, controle, entradas e saídas e parâmetros do equipamento protegido.

A Figura 3.2 apresenta dois modelos de IED's de proteção de linhas de transmissão atualmente disponíveis no mercado.



Figura 3.2 - Relé de Proteção de Distância D60 (Esquerda) e 7SA (Direita)

[GE INDUSTRIAL SYSTEMS, 2009] e [SIEMENS, 2011]

3.2.2 Funções de Proteção

O submódulo 2.6 do Procedimento de Rede do ONS⁸, em seu item 6.2, estabelece os requisitos mínimos para um Sistema de Proteção de Linhas de Transmissão, incluindo a especificação das funções de proteção e controle de tal sistema.

⁸ ONS: Operador Nacional do Sistema Elétrico Brasileiro

Para os ensaios em modelo utilizando o RTDS serão considerados os requisitos máximos estabelecidos no submódulo 2.6, ou seja, serão considerados os requisitos para linhas de transmissão com tensão nominal igual ou superior a 345 kV.

O sistema de proteção de linhas de transmissão para tensão nominal igual ou superior a 345 kV requer a utilização de conjuntos de hardware redundantes em cada terminal LT, normalmente denominados de proteção principal e proteção alternada ou suplementar. Cada um dos conjuntos deverá dispor das funções conforme indicado na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Funções de Proteção e Controle Estabelecidas no Procedimento de Rede [ONS, 2012]

FUNÇÕES	NÚMERO ANSI
Proteção de Distância	21/21N
Teleproteção	77/85
Sobrecorrente Direcional de Neutro	67/67N
Energização sob Falta (Switch Onto Fault)	50LP
Bloqueio por Oscilação de Potência	68
Perda de Sincronismo	78
Sobretensão	59
Religamento Automático	79
Check de Sincronismo	25
Supervisão de Tensão ou Falha de Fusível	60

Adicionalmente serão consideradas neste trabalho as funções de Falha de Disjuntor (50BF) e Proteção Diferencial de Linha (87L), caso as mesmas sejam incorporadas no mesmo hardware do sistema de proteção avaliado.

3.2.2.1 Proteção de Distância

Em um relé de distância, as tensões e correntes secundárias oriundas dos transformadores de corrente e tensão da LT protegida são monitoradas continuamente por unidades de detecção de falta que por sua vez são formadas por uma ou mais unidades de medição. A característica de operação das unidades de medição normalmente é definida no plano das impedâncias (R-X), conforme indicado Figura 3.3.

UNIDADE	SINAIS DE ENTRADA	CARACTERÍSTICA DE OPERAÇÃO
IMPEDÂNCIA	$COF \begin{cases} S_1 = I Z_N - V \\ (\cos) \begin{cases} S_2 = I Z_N + V \end{cases} \end{cases}$ $\theta_2 = -90^\circ \text{ e } \theta_1 = 90^\circ$	
REATÂNCIA	$COF \begin{cases} S_1 = I Z_N - V \\ (\cos) \begin{cases} S_2 = I Z_N \end{cases} \end{cases}$ $Z_N = j X_N$	
MHO	$COF \begin{cases} S_1 = I Z_N - V \\ (\cos) \begin{cases} S_2 = V \end{cases} \end{cases}$	
MHO DESLOCADA	$COF \begin{cases} S_1 = I Z_{N1} - V \\ (\cos) \begin{cases} S_2 = I Z_{N2} + V \end{cases} \end{cases}$	
LENTICULAR	$COF \begin{cases} S_1 = I Z_N - V \\ S_2 = V \end{cases}$ $\theta_2 > -90^\circ \text{ ou } \theta_1 < 90^\circ$	
TOMATE	$COF \begin{cases} S_1 = I Z_N - V \\ S_2 = V \end{cases}$ $\theta_2 < -90^\circ \text{ e } \theta_1 > 90^\circ$	
POLIGONAL	Característica composta por quatro retas (por exemplo, duas inclinadas e duas horizontais).	

Figura 3.3 - Unidades de Medição de um Relé de Distância [PEREIRA, 2011]

As unidades de detecção de falta realizam a medição da impedância equivalente vista pelo relé de proteção de acordo com o loop de medição associado, que pode ser fase-terra (AT, BT e CT) ou entre fases (AB, BC e CA). A detecção da falta ocorre quando a impedância medida e um dos loops alcança a região de operação da unidade de medição.

Normalmente um relé de distância digital completo possui em média cinco zonas de proteção associadas às unidades de medição. O ajuste de cada uma destas zonas pode variar dependendo da filosofia adotada pela concessionária. Normalmente são habilitadas de três (3) a quatro (4) zonas de proteção conforme a Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Ajuste Típico de Proteção de Distância

ZONA	APLICAÇÃO	ALCANCE	TEMPO
1 – Sentido Direto	Disparo ⁹	80% Z_{LT}	0ms
2 – Sentido Direto	Disparo + Teleproteção	$Z_{LT} + 50\% Z_{\text{Maior LT Adjacente}}$	200 a 400ms
3 – Sentido Direto	Disparo	110% $(Z_{LT} + Z_{\text{Maior LT Adjacente}})$	800ms
4 – Sentido Reverso	Teleproteção	150% $(Z_{\text{Zona 2 Term. Remoto}} - Z_{LT})$	-

3.2.2.2 Teleproteção

A teleproteção consiste basicamente na interação entre as proteções de distância de cada um dos terminais da linha de transmissão com o objetivo de localizar de forma mais confiável e com menor tempo um defeito interno na LT protegida. Tal interação é obtida por meio de equipamentos de telecomunicação (via carrier, rádio micro-ondas, fibra ótica, etc.) ou conexão direta entre os relés utilizando fibra ótica.

Os esquemas mais utilizados para teleproteção são o Esquema Permissivo de Subalcance (Permissive Under-reach Transfer Tripping Scheme - PUTT) e o Esquema Permissivo de Sobrealcance (Permissive Over-reach Transfer Tripping Scheme - POTT), sendo esse último adotado preferencialmente no setor elétrico brasileiro.

No esquema PUTT (Figura 3.4), a detecção de uma falta na Zona 1 promove o desligamento do terminal local e o envio de um sinal permissivo para o terminal remoto. No terminal remoto o desligamento somente ocorre se houver simultaneamente a partida¹⁰ da Zona 2 e a recepção do sinal permissivo emitido pelo terminal local. A recíproca é válida para a detecção da falta na Zona 1 a partir do terminal remoto.

No esquema POTT (Figura 3.5), a detecção de uma falta na Zona 2 no terminal local promove o envio de um sinal permissivo para o terminal remoto. No terminal remoto o desligamento somente ocorre se houver simultaneamente a partida da Zona 2 e a recepção do sinal permissivo emitido pelo terminal local. A recíproca é válida para a detecção inicial da falta na Zona 2 a partir do terminal remoto.

⁹ Disparo ou Trip: Comando de Desligamento a partir do relé de proteção. Pode ser instantâneo ou temporizado a partir do início da falha.

¹⁰ Partida ou Pickup: Sensibilização da proteção a partir do início de uma falha.

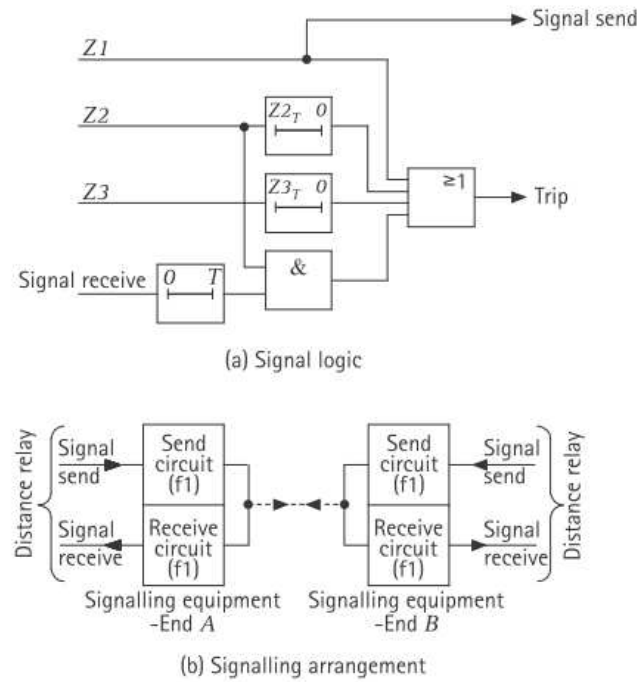


Figura 3.4 - Lógica do Esquema PUTT [DISTANCE PROTECTION SCHEMES, 2012]

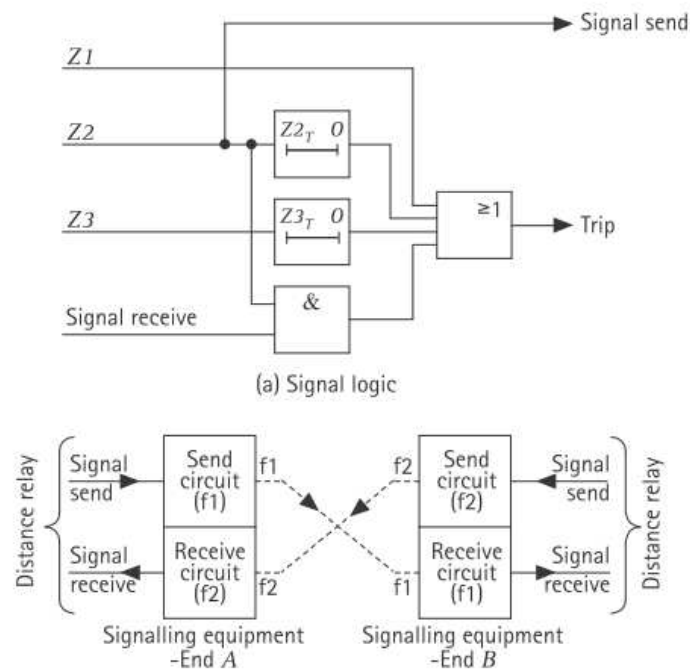


Figura 3.5 - Lógica do Esquema POTT [DISTANCE PROTECTION SCHEMES, 2012]

O esquema POTT pode ser complementado com a unidade direcional de neutro, função 67N. Neste caso a lógica é similar, porém utiliza o sinal de pick-up desta função no envio do sinal permissivo e na lógica de disparo local.

Os esquemas de teleproteção estão também associados com lógicas auxiliares, dentre as quais as mais usuais são:

- ECHO: Esta lógica faz com que o terminal remoto retorne um sinal permissivo emitido a partir do terminal local na condição de disjuntor remoto aberto. Seu objetivo é permitir a eliminação rápida de uma falha pela teleproteção quando um dos disjuntores já estiver aberto.

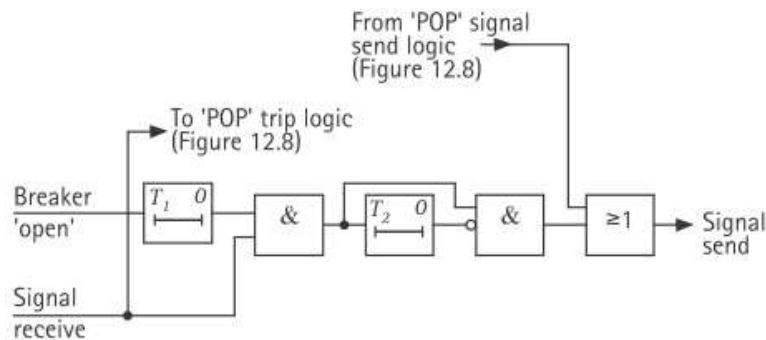


Figura 3.6 - Exemplo de Lógica ECHO [DISTANCE PROTECTION SCHEMES, 2012]

- WEAK INFEED (Figura 3.7): Permite o disparo da teleproteção durante uma falha na qual um dos terminais é uma fonte equivalente fraca incapaz de sensibilizar sua proteção. Para isto é verificado principalmente o nível de afundamento de tensão no terminal fraco durante a recepção de um sinal permissivo.

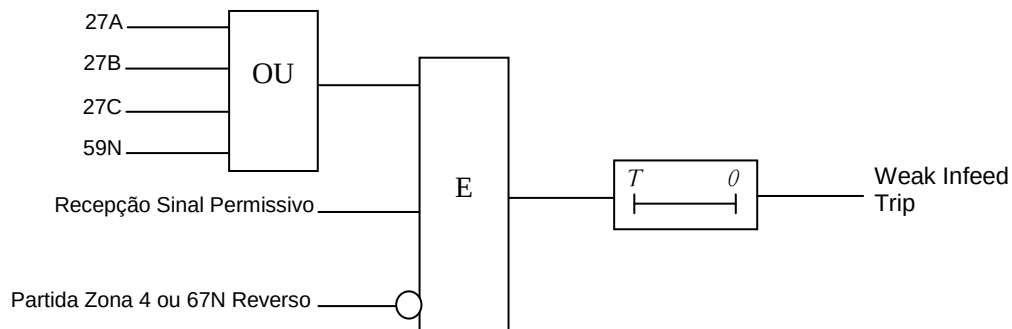


Figura 3.7 - Exemplo de Lógica WEAK INFEED [WANG, 2011]

- TRANSIENT BLOCKING (Figura 3.8): Em LT's de circuito duplo durante uma falha mais próxima a uma das subestações é comum a abertura inicial do disjuntor da LT defeituosa mais próximo ao curto-circuito. Neste instante ocorre uma reversão súbita do fluxo de corrente no circuito normal que pode levar a uma atuação indevida da proteção deste circuito se o esquema de teleproteção adotado for de sobrealcance. A lógica de Transient Blocking inibe a atuação do esquema de teleproteção durante uma inversão súbita do fluxo de corrente, evitando assim o disparo acidental da proteção.

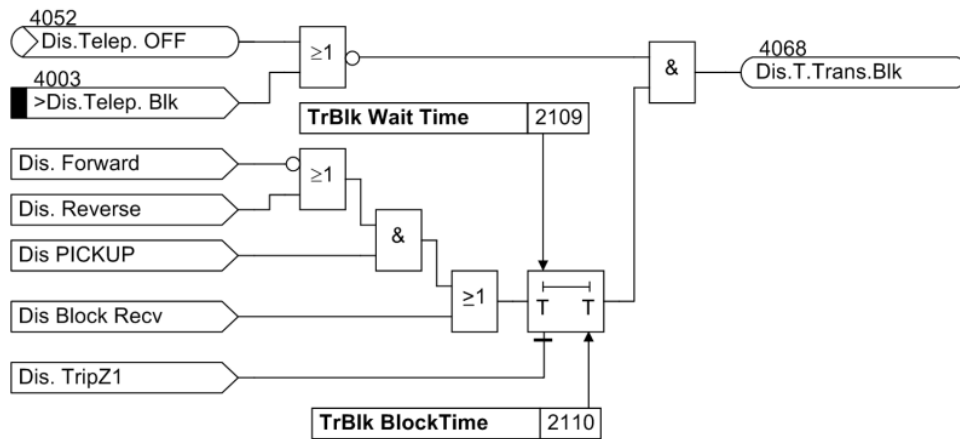


Figura 3.8 - Lógica TRANSIENT BLOCKING do Relé 7SA [SIEMENS, 2011]

3.2.2.3 Sobrecorrente Direcional de Neutro

A função 67N consiste em uma unidade de sobrecorrente polarizada por correntes e tensões de sequência zero ou em alguns relés por sequência negativa. O sentido de operação é definido em direção ao equipamento protegido, ou seja, no sentido direto.

A Figura 3.9 apresenta um exemplo de polarização da função 67N adotada nos relés de proteção do fabricante SIEMENS.

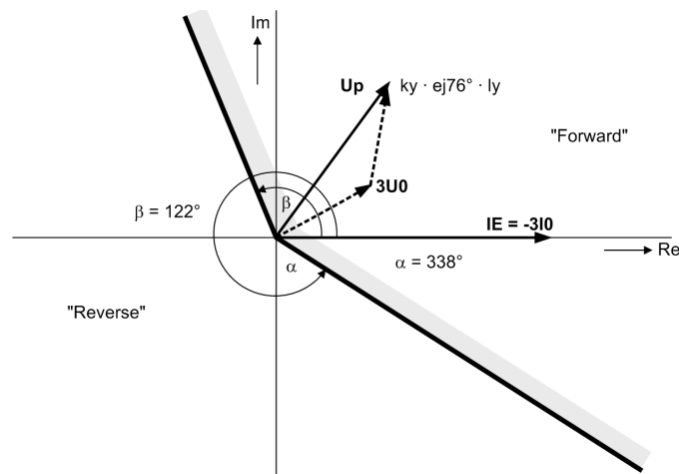


Figura 3.9 - Polarização da Função 67N do Relé 7SA [SIEMENS, 2011]

O ajuste da proteção de sobrecorrente direcional de neutro visa a detecção de faltas à terra de alta impedância normalmente não cobertas pela proteção de distância. O tempo de operação deverá ser adequado para que a mesma não atue para faltas externas, sendo normalmente ajustado em 400 milissegundos para um defeito no terminal remoto.

3.2.2.4 Energização sob Falta

Esta função de proteção consiste em detectar um curto-circuito na linha de transmissão durante sua energização. Normalmente utiliza-se uma unidade de sobrecorrente habilitada temporariamente após o comando de fechamento do disjuntor. Neste caso é necessário que o relé receba em uma de suas entradas digitais a informação de comando de fechamento manual do disjuntor da LT.

A Figura 3.10 apresenta uma lógica típica da função de energização sob falta.

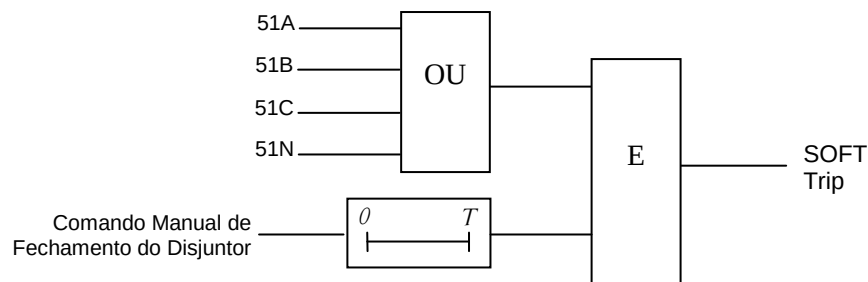


Figura 3.10 - Exemplo de Lógica de Energização sob Falta (SOFT)

3.2.2.5 Bloqueio por Oscilação de Potência e Perda de Sincronismo

A oscilação de potência é um fenômeno do Sistema Elétrico de Potência que ocorre após distúrbios e em condições de operações fora do limite de estabilidade deste sistema. A oscilação de potência pode ser caracterizada por um fenômeno estável ou instável dependendo de sua origem e configuração do sistema. As oscilações estáveis não representam uma ameaça para a operação de um sistema elétrico, pois este responde no sentido de amortecer tal fenômeno.

Ao analisar tais oscilações elétricas e o seu comportamento no plano das impedâncias vistas por um relé de distância, observa-se que estas oscilações são caracterizadas por um lugar geométrico da impedância de sequência positiva conforme representado pelas curvas 1, 2 e 3 da Figura 3.11. As curvas 1 e 2 representam um fenômeno instável e a curva 3 um fenômeno estável.

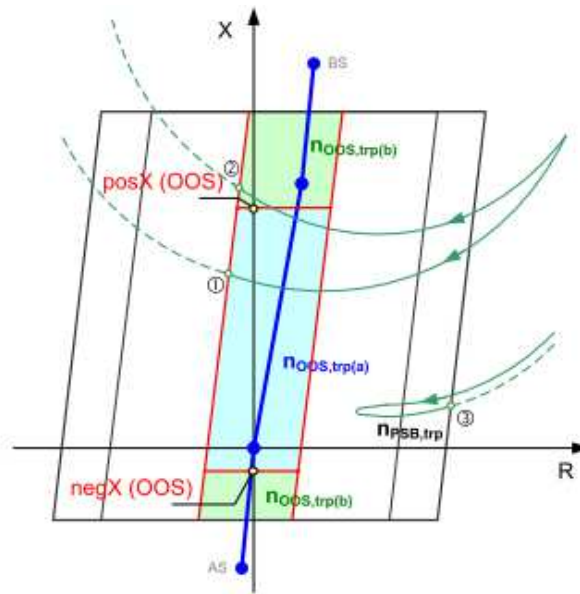


Figura 3.11 - Característica do Bloqueio por Oscilação de Potência do Relé P437 [AREVA, 2011]

Dependendo da intensidade da oscilação é possível que as unidades de detecção de falta do relé de proteção venham a ser sensibilizadas ou até mesmo atuem de forma indevida, o que não é desejado no caso das oscilações estáveis ou até mesmo das oscilações instáveis.

A função de bloqueio de oscilação de potência é um recurso dos relés de proteção que permite o bloqueio temporário das funções de distância durante a ocorrência deste fenômeno. Esta função consiste basicamente de duas unidades de medição do tipo poligonal (Figura 3.11) ou MHO que detectam a trajetória de impedância durante uma oscilação e o tempo decorrido para a sensibilização dessas unidades de medição. Oscilações elétricas são caracterizadas por fenômenos lentos se comparados a curtos-circuitos, sendo este o mecanismo empregado para a diferenciação entre um curto-circuito e uma situação de oscilação de potência na qual a proteção deverá ser inibida.

As oscilações instáveis representam um risco para a operação do sistema elétrico como um todo e são causadas pela perda de sincronismo entre subsistemas. Para este tipo de situação torna-se necessário a desconexão das interligações entre os subsistemas afetados como medida de controle de emergência para a preservação da integridade dos mesmos.

A função de Perda de Sincronismo utiliza as mesmas unidades de medição da função 68, porém há diferentes recursos adotados pelos fabricantes para a distinção entre fenômenos estáveis e instáveis.

No relé P437 da AREVA as oscilações instáveis são determinadas se houver o cruzamento do lugar geométrico da impedância de sequência positiva (vista pelo relé) com os

lados direito e esquerdo dos polígonos das unidades de medição nesta sequência ou na sequência inversa.

No relé D60 da GENERAL ELECTRIC as oscilações instáveis são caracterizadas pela passagem e tempo de permanência da impedância de sequência positiva (vista pelo relé) pelas unidades de medição externas e logo em seguida nas unidades internas (Figura 3.12).

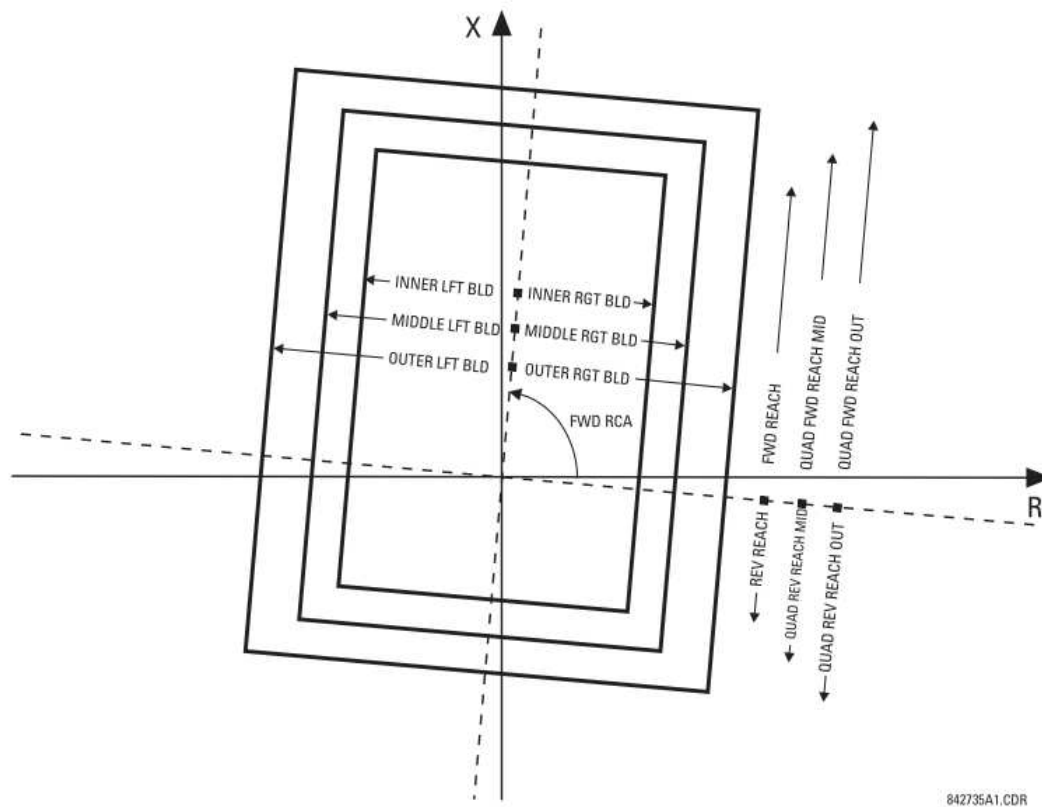


Figura 3.12 - Característica da Função 68 e 78 do Relé D60 [GE INDUSTRIAL SYSTEMS, 2009]

3.2.2.6 Sobretensão

A função de sobretensão consiste simplesmente em um bloco comparador da tensão entre fases ou fase-terra com um ajuste parametrizado no relé de proteção. A saída do bloco comparador pode estar associada a um temporizador ajustado no valor desejado para o disparo da proteção. Normalmente são habilitados um estágio instantâneo de sobretensão nas três fases e um estágio temporizado, por fase, conforme requisitos do submódulo 2.6 do Procedimento de Rede do ONS.

3.2.2.7 Religamento Automático

A maior parte das falhas ocorridas em linhas de transmissão está relacionada com defeitos temporários como, por exemplo, descargas atmosféricas.

O religamento automático é um recurso disponível para minimizar o tempo de indisponibilidade da linha de transmissão durante a ocorrência dos defeitos temporários. Esta função de controle consiste em comandar automaticamente o fechamento do disjuntor após um tempo programado, denominado tempo morto, contado a partir da abertura do disjuntor por uma atuação de proteções de detecção de falhas internas na LT (geralmente teleproteção e primeira zona da função de distância). O religamento ocorre nos dois terminais da linha de transmissão, sendo o primeiro terminal a religar chamado de terminal iniciador e o segundo terminal a religar chamado de seguidor.

Há dois tipos de religamento, monopolar e tripolar. No religamento monopolar somente o polo disjuntor da fase defeituosa é aberto e religado automaticamente permanecendo os demais polos fechados. No religamento tripolar ocorre a abertura e o religamento dos três polos do disjuntor. Um religamento é considerado satisfatório se o defeito é eliminado e o ciclo de religamento é completado energizando por completo a LT.

3.2.2.8 Check de Sincronismo

A função de check de sincronismo é uma função de controle que permite o fechamento manual ou automático do disjuntor em condições seguras para o equipamento e para o sistema. Para tal são verificadas se as diferenças angulares, de frequência e de tensão entre os terminais do disjuntor (lado da barra e lado da linha) estão dentro das margens parametrizadas na função de check de sincronismo (25). A função 25 permite também o fechamento do disjuntor com ausência de tensão em um ou em ambos os lados de acordo com a condição parametrizada.

O check de sincronismo é executado durante comandos manuais de fechamento do disjuntor ou durante religamentos automáticos, sendo que neste último caso a configuração do check de sincronismo estabelece quem são os terminais iniciador e seguidor.

3.2.2.9 Falha de Fusível

A função de falha de fusível é responsável por detectar falhas no circuito de tensão e bloquear as funções de proteção susceptíveis à atuação indevida ou mau funcionamento decorrente da perda de potencial, como por exemplo, as proteções de distância e sobrecorrente direcionais.

O algoritmo da função de falha de fusível consiste em verificar as componentes simétricas das tensões e correntes medidas pelo relé. Durante uma falha no circuito de potencial não são esperadas distorções nas correntes medidas pelo relé, enquanto que durante um curto-circuito ambas correntes e tensões têm os seus módulos e componentes afetados.

A Figura 3.13 apresenta um exemplo de lógica de funcionamento da função de falha de fusível adotada nos relés de proteção do fabricante SIEMENS.

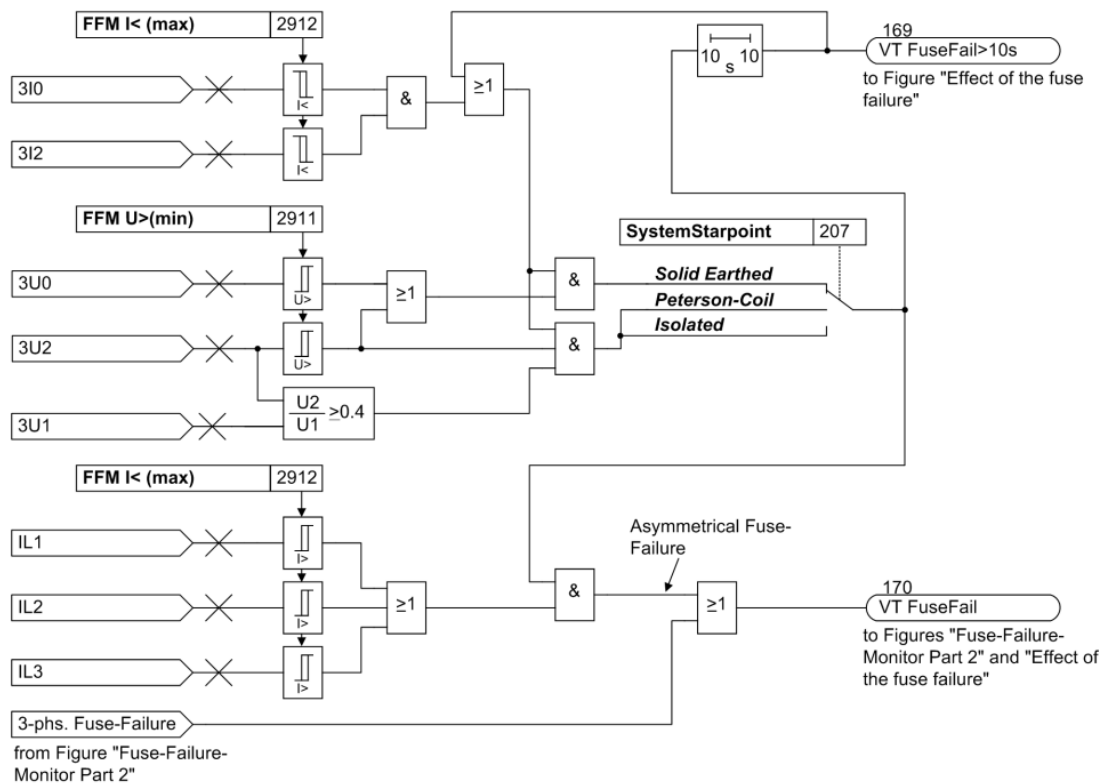


Figura 3.13 - Função Falha de Fusível do Relé 7SA [SIEMENS, 2011]

Como os relés perdem suas funcionalidades principais durante um defeito no circuito de tensão, em alguns casos são habilitadas unidades de sobrecorrente de emergência como retaguarda no caso de ocorrência de curtos-circuitos no equipamento protegido.

3.1.2.10 Falha de Disjuntor

O princípio da proteção de falha de disjuntor é baseado na verificação do estado do disjuntor e nas correntes que passam pelo terminal da linha de transmissão após o envio de um comando de disparo pela proteção. A princípio a função de falha de disjuntor realiza uma nova tentativa de disparo do disjuntor, usualmente conhecida como *Retrip*. Qualquer falha no circuito de disparo ou nos mecanismos de abertura de qualquer um dos polos do disjuntor impedirá a abertura do mesmo e fará com que a proteção atue seu último estágio desligando os circuitos adjacentes da mesma subestação, enviando também um sinal de disparo para o disjuntor do terminal remoto (transfer trip).

A Figura 3.14 apresenta um exemplo de lógica de funcionamento da função de retrip enquanto que a Figura 3.15 apresenta a lógica de funcionamento da função de falha de disjuntor, ambas adotadas nos relés de proteção do fabricante AREVA.

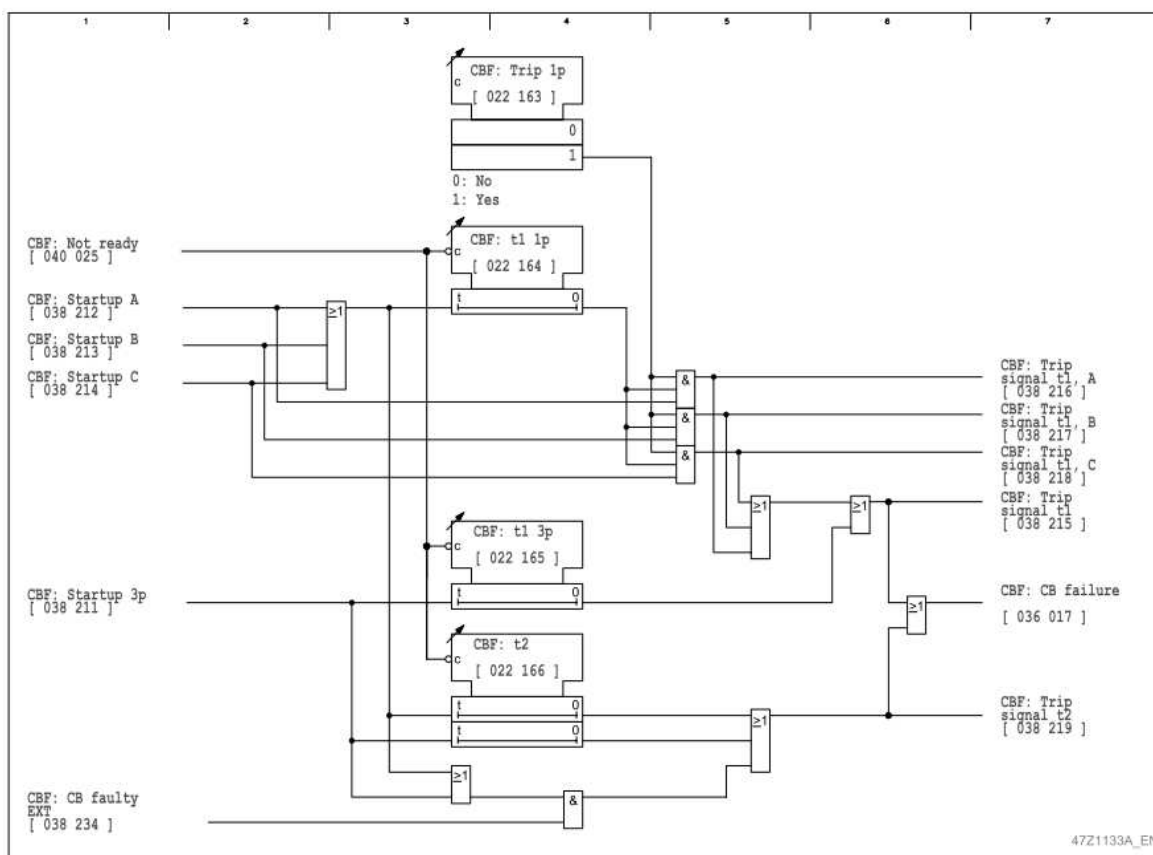


Figura 3.14 - Lógica Retrip do Relé P437 [AREVA, 2011]

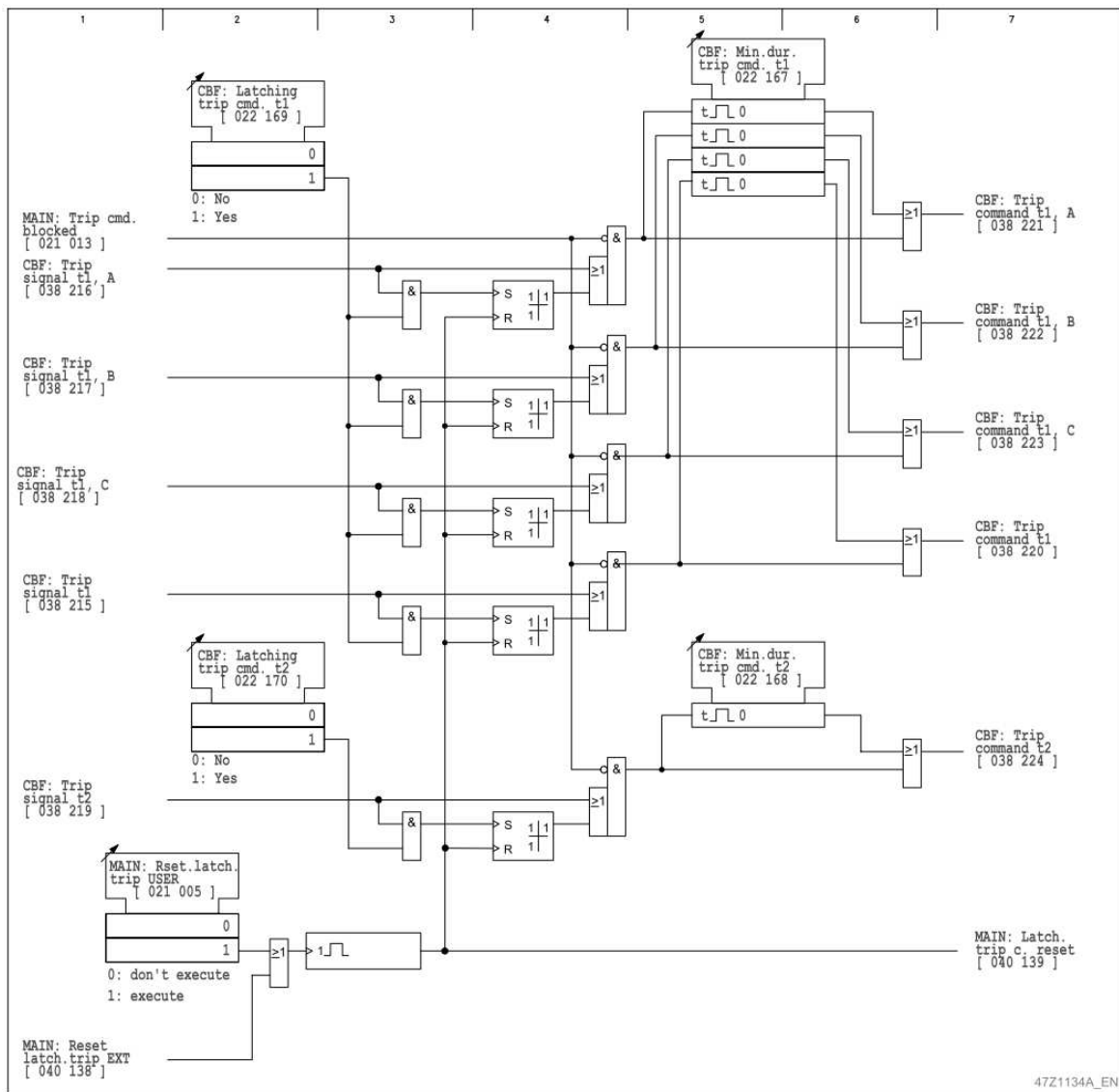


Figura 3.15 - Lógica de Disparo da Função 50BF do Relé P437 [AREVA, 2011]

3.1.2.11 Proteção Diferencial de Linha

A proteção diferencial de linha consiste na comparação das correntes em ambos os terminais de uma linha de transmissão. Em cada um dos terminais são instalados relés de proteção que se comunicam entre si por meio de um link direto, normalmente em fibra ótica. Cada um dos relés de proteção realiza a sincronia das amostras da corrente local com as amostras de corrente remotas recebidas a partir do link de comunicação de forma a calcular a corrente resultante da comparação das amostras.

A característica de operação de proteção diferencial de linha é similar à proteção de transformadores. O ajuste da corrente diferencial mínima é realizado em função das correntes das capacitâncias shunt das linhas de proteção e em alguns casos, como em linhas longas ou subterrâneas, o ajuste se dá em função da corrente transitória de energização da LT.

A Figura 3.16 apresenta a característica de operação da função diferencial do relé 7SD da SIEMENS.

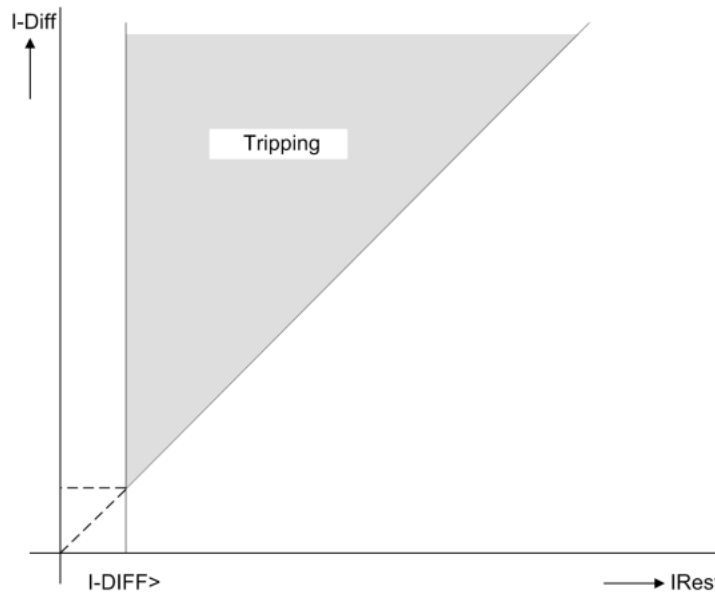


Figura 3.16 - Característica de Operação Função 87L do Relé 7SD [SIEMENS, 2011]

3.3 Variáveis de Entrada

Durante a execução das simulações de um ensaio de modelo de relés de proteção o RTDS armazena os dados registrados de cada uma das simulações em uma base de dados. Estes dados são constituídos principalmente de informações das especificações dos ensaios e dos pontos monitorados dos relés de proteção e dos componentes simulados no próprio RTDS.

Para a realização da Análise Automática das Simulações torna-se necessária a padronização das informações contidas na base de dados, que na verdade se resumem em variáveis do tipo analógicas e digitais.

A partir da padronização da base de dados do RTDS é possível a criação de um software que permite a leitura e o processamento das variáveis registradas. Contudo para a avaliação dos resultados é necessário estabelecer variáveis do próprio programa de Análise de Resultados que serão utilizadas nas lógicas de avaliação.

O conjunto de todas as variáveis registradas na base de dados do RTDS e das variáveis que serão utilizadas nas lógicas de avaliação do programa serão identificadas neste trabalho de monografia como *Variáveis de Entrada* do software de Análise de Resultados.

Com o objetivo de facilitar o processo de identificação das Variáveis de Entradas foram estabelecidas três categorias de classificação: 1) Variáveis de Entrada Definidas no Software de

Análise de Resultados, 2) Variáveis de Entrada Especificadas para o Ensaio de Modelo, 3) Variáveis de Entrada Registradas Durante o Ensaio de Modelo. As três categorias são apresentadas nas Tabelas 3.3, 3.4 e 3.5.

Tabela 3.3 - Variáveis de Entrada Definidas no Software de Análise de Resultados

VARIÁVEL	DESCRIÇÃO
79_1P_T1	Tempo morto para religamento monopolar parametrizado no relé de proteção
79_1P_T2	Tolerância para verificação do tempo morto do religamento monopolar
79_3P_T1	Tempo morto para religamento tripolar parametrizado no relé de proteção
79_3P_T2	Tolerância para verificação do tempo morto do religamento tripolar
79_1P_ON	Religamento tripolar habilitado
21N_SENS	Sensibilidade prevista para a proteção de distância 21N em ohms
21ZI_REACH	Alcance parametrizado no relé de proteção da Zona 1 em % do comprimento da LT
21Z2_REACH	Alcance parametrizado no relé de proteção da Zona 2 em % do comprimento da LT
TIME_SET	Tempo desejado para eliminação completa da falta
TIME_MAX	Tempo máximo para verificação de abertura do polo do disjuntor

Tabela 3.4 - Variáveis de Entrada Especificadas para o Ensaio de Modelo

VARIÁVEL	DESCRIÇÃO
NUM	Identifica o número do caso simulado
SECAO	Refere-se à seção do documento que especifica a simulação – Roteiro de Ensaio
DATA_HORA	Data e hora de início do teste
TIPO	Tipo de falta: AN, BN, CN, AB, BC, CA, ABN, BCN, CAN, ABC, ABCN
LOCAL	Localização da Falta. Para faltas internas será indicado o percentual do comprimento da LT correspondente ao ponto de aplicação do curto-circuito
RES_FF	Resistência de falta para loop entre fases
RES_FT	Resistência de falta para loop fase-terra
FALTA_INI	Tempo especificado para o início da falta
FALTA_FIM	Tempo especificado para o fim da falta
POW	Ângulo de incidência da falta
CARGA	Condição de carregamento da LT
RA	Previsão de Religamento Automático

Tabela 3.5 - Variáveis de Entrada Registradas Durante o Ensaio de Modelo

VARIÁVEL	DESCRIÇÃO
RA_CLOSE	Religamento Automático – Número de tentativas de religamento verificado
RA_RAS	Religamento Automático – Confirmação de religamento satisfatório
RA_TMORTO	Religamento Automático – Tempo morto verificado
RA_27/25	Religamento Automático – Permissão de fechamento do disjuntor pelas função de check de sincronismo ou linha/barra morta
RA_INPROGRESS	Religamento Automático em curso
RA_BLOCK	Religamento Automático bloqueado
21Z1_TRIP	Proteção de Distância Zona 1 – Disparo
21Z2_PKP	Proteção de Distância Zona 2 – Partida
21Z2_TRIP	Proteção de Distância Zona 2 – Disparo
21Z3_PKP	Proteção de Distância Zona 3 – Partida
21Z3_TRIP	Proteção de Distância Zona 3 – Disparo
POTT21_PKP	Esquema de Teleproteção POTT pela função 21/21N – Partida
POTT21_TRIP	Esquema de Teleproteção POTT pela função 21/21N – Disparo
POTT21_REV	Esquema de Teleproteção POTT pela função 21/21N – Detecção de falta no sentido reverso (barra).
POTT21_FW	Esquema de Teleproteção POTT pela função 21/21N – Detecção de falta no sentido direto (linha).
POTT21_RX	Esquema de Teleproteção POTT pela função 21/21N – Recepção de sinal permissivo.
POTT21_TX	Esquema de Teleproteção POTT pela função 21/21N – Envio de sinal permissivo.
TRANSBLK_21	Esquema de Teleproteção POTT pela função 21/21N – Função bloqueada pela lógica TRANSIENT BLOCK
POTT67N_PKP	Esquema de Teleproteção POTT pela função 67N – Partida
POTT67N_TRIP	Esquema de Teleproteção POTT pela função 67N – Disparo
POTT67N_REV	Esquema de Teleproteção POTT pela função 67N – Detecção de falta no sentido reverso (barra).
POTT67N_FW	Esquema de Teleproteção POTT pela função 67N – Detecção de falta no sentido direto (linha).
POTT67N_RX	Esquema de Teleproteção POTT pela função 67N – Recepção de sinal permissivo.
POTT67N_TX	Esquema de Teleproteção POTT pela função 67N – Envio de sinal permissivo.
TRANSBLK_67N	Esquema de Teleproteção POTT pela função 67N – Função bloqueada pela lógica TRANSIENT BLOCK
TDD_RXA	Recepção de Transfer Trip – Fase A
TDD_RXB	Recepção de Transfer Trip – Fase B
TDD_RXC	Recepção de Transfer Trip – Fase C
TDD_TXA	Transmissão de Transfer Trip – Fase A
TDD_TXB	Transmissão de Transfer Trip – Fase B
TDD_TXC	Transmissão de Transfer Trip – Fase C
ECHO_TX	Atuação da lógica ECHO
WEAKINF_TRIP	Atuação da lógica WEAK-INFEED
67N_PKP	Sobrecorrente Direcional de Neutro - Partida

67N_TRIP	Sobrecorrente Direcional de Neutro - Disparo
60_ON	Função Falha de Fusível – Bloqueio atuado
BKP51N_PKP	Função Falha de Fusível – Partida da unidade de sobrecorrente de emergência
BKP51N_TRIP	Função Falha de Fusível – Disparo da unidade de sobrecorrente de emergência
SOTF_TRIP	Energização sob Falta – Disparo
68_BLK	Oscilação de Potência – Bloqueio Atuado
78_TRIP	Perda de Sincronismo – Disparo
50BF_START	Falha de Disjuntor – Partida
50BF_RETRIP	Falha de Disjuntor – Disparo no disjuntor local
50BF_TRIP	Falha de Disjuntor – Disparo nos disjuntores adjacentes
87L_TRIPA	Proteção Diferencial de Linha – Disparo fase A
87L_TRIPB	Proteção Diferencial de Linha – Disparo fase B
87L_TRIPC	Proteção Diferencial de Linha – Disparo fase C

3.4 Critérios de Avaliação – Falhas Internas em uma Linha de Transmissão com Religamento Automático Satisfatório

As Variáveis de Entradas definidas nas Tabelas 3.3, 3.4, 3.5 permitem o estabelecimento de regras e critérios de avaliação que permitem aprovar e rejeitar cada uma das simulações realizadas no ensaio de modelo.

Neste trabalho de monografia será estudado um caso de exemplo de aplicação dos critérios de análise, especificamente para *Falhas Internas em uma Linha de Transmissão com Religamento Automático Satisfatório*.

No caso avaliado será considerada a habilitação das funções de proteção apresentadas na Tabela 3.1, com exceção das funções de proteção 59, 50BF e 87L. O religamento automático será do tipo monopolar.

3.4.1 Avaliação do Tempo de Eliminação de Falta e Abertura Correta do Disjuntor

As primeiras análises realizadas na avaliação de uma simulação de falha interna em uma linha de transmissão são a verificação do tempo de eliminação da falta e abertura do polo correto do disjuntor para faltas monofásicas, sendo que para faltas entre fases a abertura deverá ser simultânea nos três polos.

De acordo com o submódulo 2.6 do Procedimento de Rede do ONS, o tempo máximo permitido para eliminação de faltas em linhas de transmissão com tensão nominal igual e

superior a 345kV é de 100 milissegundos. Este tempo é contado a partir da incidência do curto-circuito até a abertura e extinção das correntes de falta pelo disjuntor.

Para faltas monofásicas, a proteção deve comandar somente a abertura do polo submetido à falta, permitindo a eliminação completa do curto-circuito na fase faltosa em até 100 milissegundos. Para as faltas entre fases a proteção deve comandar a abertura dos três polos do disjuntor eliminando o curto-circuito também em até 100 milissegundos.

Com o objetivo de facilitar a programação do software de Análise de Resultados, foram criadas estruturas lógicas que sintetizam as regras e critérios estabelecidos, permitindo sua melhor visualização e entendimento. As lógicas são construídas sob as Variáveis de Entrada definidas anteriormente no item 3.2.

A lógica de Avaliação de Tempo de Eliminação de Falta e Abertura Correta do Disjuntor é apresentada na Figura 3.17.

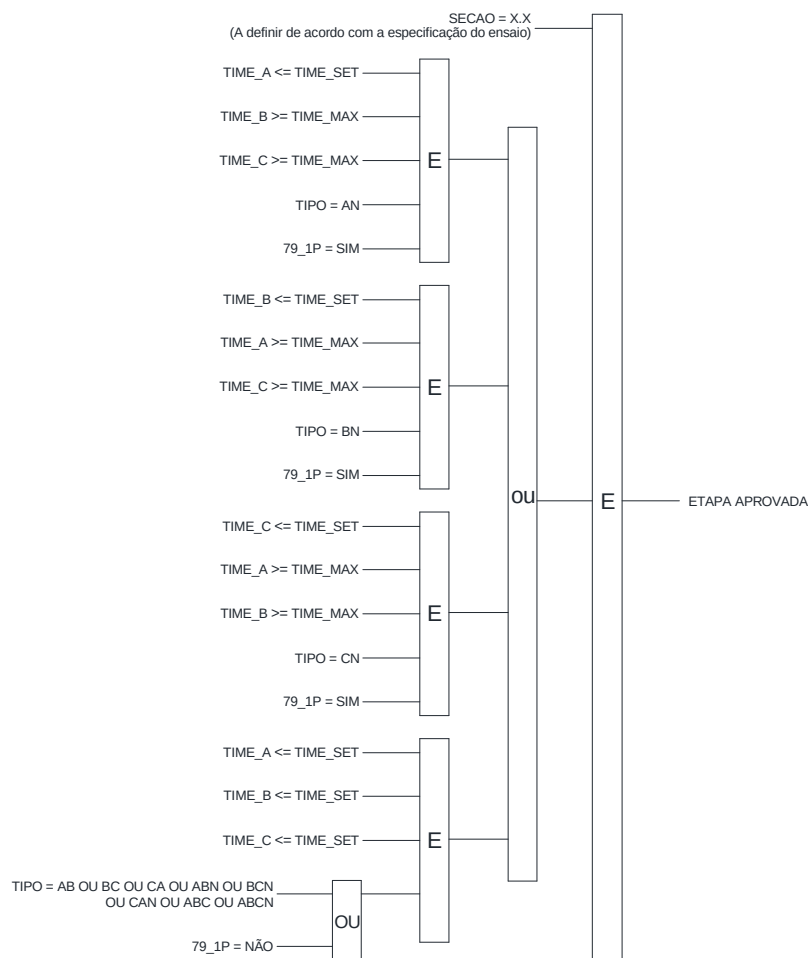


Figura 3.17 - Lógica de Avaliação do Tempo de Eliminação de Falta e Abertura do Polo Correto

3.4.2 Avaliação das Respostas das Funções de Proteção

O passo seguinte para análise do caso estudado é avaliar as respostas das funções de proteção. Para falhas internas em uma linha de transmissão a atuação das funções de proteção dependerá principalmente da localização da falta em relação ao terminal da LT avaliado e da resistência de falta que afeta diretamente a sensibilidade das proteções de distância.

Considerando uma falta fase-terra ou entre fases de baixa impedância próxima ao terminal protegido, espera-se primeiramente a atuação da primeira zona de distância; a partida da segunda zona; a partida do esquema de teleproteção (21 ou 21N/67N considerando faltas a terra) com a detecção da falta no sentido da linha (sentido direto) e o envio de sinal permissivo. Logo em seguida vem a recepção do sinal permissivo do terminal remoto e o disparo do esquema de teleproteção (21 ou 21N/67N considerando faltas a terra). Não é esperada a atuação da lógica Transient Blocking e das funções de Falha de Fusível, Bloqueio de Oscilação de Potência, Perda de Sincronismo e Energização sob Falta.

Para faltas mais distantes do terminal protegido, entre fases ou fase-terra de baixa impedância, espera-se a partida da segunda zona; a partida do esquema de teleproteção (21 ou 21N/67N considerando faltas a terra) com a detecção da falta no sentido da linha (sentido direto) e o envio de sinal permissivo. Logo em seguida vem a recepção do sinal permissivo do terminal remoto e o disparo do esquema de teleproteção (21 ou 21N/67N considerando faltas a terra). Não é esperada a atuação da lógica Transient Blocking e das funções de Falha de Fusível, Bloqueio de Oscilação de Potência, Perda de Sincronismo e Energização sob Falta.

Para faltas a terra de alta impedância é possível que ocorra a sensibilização somente dos elementos direcionais de neutro, 67N. Neste caso é prevista a partida do esquema de teleproteção 67N com a detecção da falta no sentido da linha (sentido direto) e o envio de sinal permissivo. Logo em seguida vem a recepção do sinal permissivo do terminal remoto e o disparo do esquema de teleproteção 67N. Não é esperada a atuação da lógica Transient Blocking e das funções de Falha de Fusível, Bloqueio de Oscilação de Potência, Perda de Sincronismo e Energização sob Falta.

A lógica de avaliação das respostas das funções de proteção é apresentada na Figura 3.18.

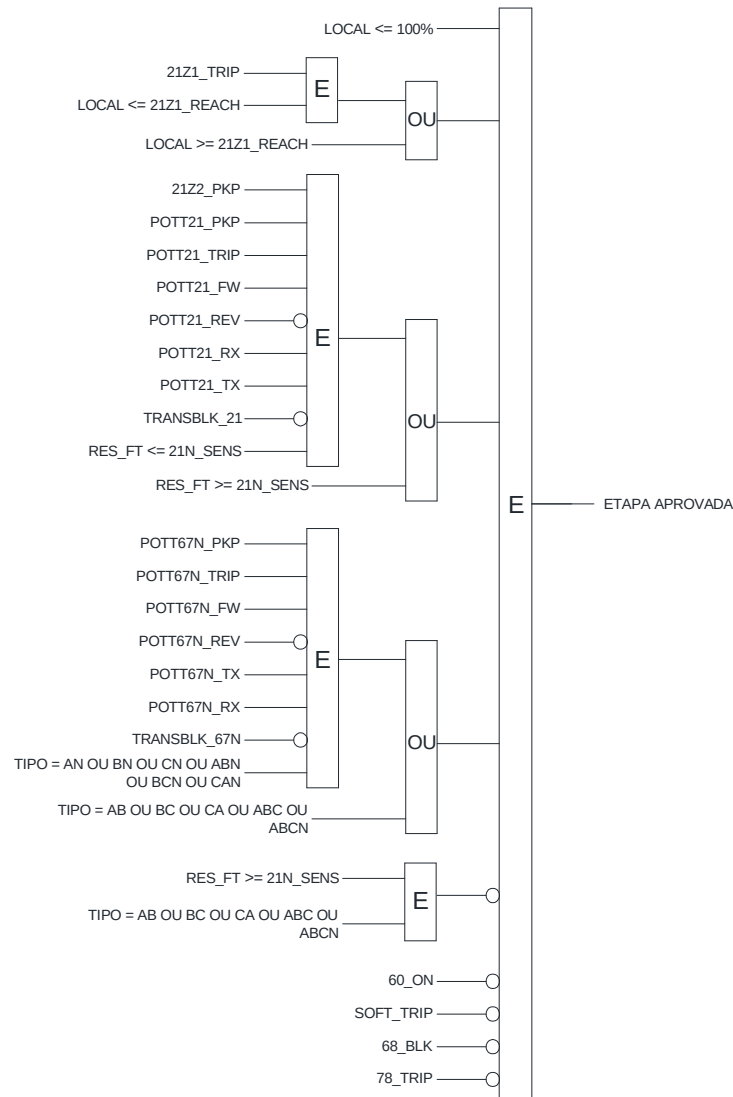


Figura 3.18 - Lógica de Avaliação das Respostas das Funções de Proteção

3.4.3 Avaliação do Religamento Automático

A última etapa de avaliação consiste na verificação do funcionamento da função de Religamento Automático. A simulação é considerada aprovada se houver um comando de religamento do disjuntor e o tempo morto medido for compatível com o tempo previsto pelo software de análise, calculado a partir da soma do tempo morto parametrizado e sua tolerância. Ressalta-se que o tempo morto está também relacionado com o tipo de religamento executado: monopolar ou tripolar.

A ocorrência de qualquer bloqueio na função de religamento que por ventura venha a ocorrer durante a execução da simulação é motivo de reprovação da mesma.

A lógica de Avaliação do Religamento Automático é apresentada na Figura 3.19.

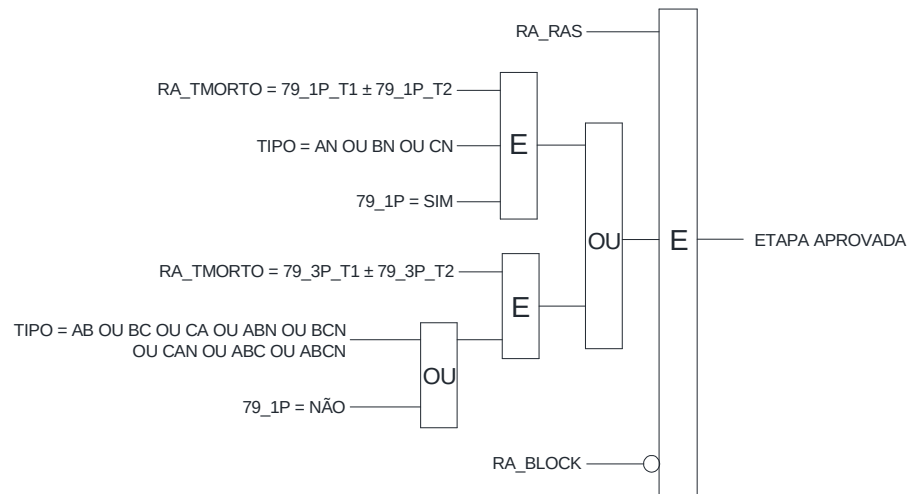


Figura 3.19 - Lógica de Avaliação do Religamento Automático

4 Software de Análise de Resultados

4.1 Apresentação

Os resultados gerados pelo RTDS em um ensaio em modelo são normalmente apresentados sob a forma de uma planilha contendo em sua linha superior a identificação das variáveis e nas linhas subsequentes os valores registrados individualmente para cada uma destas variáveis. A Figura 4.1 representa um exemplo resumido de uma destas planilhas resultantes de um ensaio de modelo de proteções de linhas de transmissão.

Test Index	Section	Time	Date	Fault Type	Fault Location	POW	Ph-N Fault Resistance (ohms)	Ph-Ph Fault Resistance (ohms)	t1 (s)	trecl (s)	t2 (s)	Trip Phase A (s)	Trip Phase B (s)	Trip Phase C (s)	Z1 Trip (s)	Z2 Trip (s)
69	4.3.1	08:14:40	17/06/2008	AN	Fe1	0	0,01	-	0,06	1	1,05	0	0	0	0	0
71	4.3.1	08:15:57	17/06/2008	BCN	Fe1	0	0,01	0,01	0,06	1	1,05	0	0	0	0	0
77	4.3.1	08:17:12	17/06/2008	AN	Fe2	0	0,01	-	0,06	1	1,05	0	0	0	0	0
79	4.3.1	08:18:28	17/06/2008	BCN	Fe2	0	0,01	0,01	0,06	1	1,05	0	0	0	0	0
82	4.3.1	08:19:42	17/06/2008	AB	Fe2	90	-	0,01	0,06	1	1,05	0	0	0	0	0
85	4.3.2	08:20:57	17/06/2008	AN	Fe1	0	100	-	0,06	1	1,05	0	0	0	0	0
87	4.3.2	08:22:14	17/06/2008	BCN	Fe1	0	20,01	0,02	0,06	1	1,05	0	0	0	0	0
93	4.3.2	08:23:29	17/06/2008	AN	Fe2	0	100	-	0,06	1	1,05	0	0	0	0	0
95	4.3.2	08:24:46	17/06/2008	BCN	Fe2	0	20,01	0,02	0,06	1	1,05	0	0	0	0	0
126	4.4.2	08:26:00	17/06/2008	AN	Fe2	0	0,01	-	0,05	0,96	1,01	0	0	0	0	0
127	4.4.2	08:26:48	17/06/2008	AN	Fe2	0	0,01	-	0,05	1	1,05	0	0	0	0	0
128	4.4.2	08:27:35	17/06/2008	AN	Fe2	0	0,01	-	0,05	1,04	1,09	0	0	0	0	0
1069	4.3.1	08:28:49	17/06/2008	AN	Fe1	0	0,01	-	0,06	1	1,05	0	0	0	0	0
1071	4.3.1	08:30:03	17/06/2008	BCN	Fe1	0	0,01	0,01	0,06	1	1,05	0	0	0	0	0
1077	4.3.1	08:31:16	17/06/2008	AN	Fe2	0	0,01	-	0,06	1	1,05	0	0	0	0	0
1079	4.3.1	08:32:31	17/06/2008	BCN	Fe2	0	0,01	0,01	0,06	1	1,05	0	0	0	0	0
1082	4.3.1	08:33:44	17/06/2008	AB	Fe2	90	-	0,01	0,06	1	1,05	0	0	0	0	0
1085	4.3.2	08:34:58	17/06/2008	AN	Fe1	0	100	-	0,06	1	1,05	0	0	0	0	0
1087	4.3.2	08:36:12	17/06/2008	BCN	Fe1	0	20,01	0,02	0,06	1	1,05	0	0	0	0	0
1093	4.3.2	08:37:27	17/06/2008	AN	Fe2	0	100	-	0,06	1	1,05	0	0	0	0	0
1095	4.3.2	08:38:41	17/06/2008	BCN	Fe2	0	20,01	0,02	0,06	1	1,05	0	0	0	0	0
1126	4.4.2	08:39:56	17/06/2008	AN	Fe2	0	0,01	-	0,05	0,96	1,01	0	0	0	0	0
1127	4.4.2	08:40:42	17/06/2008	AN	Fe2	0	0,01	-	0,05	1	1,05	0	0	0	0	0
1128	4.4.2	08:41:28	17/06/2008	AN	Fe2	0	0,01	-	0,05	1,04	1,09	0	0	0	0	0

Figura 4.1 - Exemplo Planilha de Resultados Ensaio de Modelo [CEMIG, 2008]

Atualmente o processo de análise desta planilha é manual, cabendo ao usuário a verificação pontual dos valores registrados em cada uma das simulações, tornando o trabalho susceptível a erros de análise e principalmente exige uma grande quantidade de horas de engenharia para se obter uma conclusão final.

Conforme dito nos capítulos anteriores um dos objetivos do projeto de P&D é o desenvolvimento de um software que permite a automatização deste processo, de forma que as avaliações pontuais sejam realizadas por um programa computacional a partir de critérios lógicos, como aqueles apresentados no Capítulo 3.

A etapa inicial deste trabalho consiste em estabelecer para o RTDS as Variáveis de Entrada, definidas nas Tabelas 3.3, 3.4 e 3.5 do Capítulo 3, como sendo as variáveis de registro da sua base de dados, fazendo com que as mesmas sejam escritas em uma ordem lógica.

A Figura 4.2 mostra uma ideia de como deverá ser a planilha gerada pelo RTDS contendo o registro das Variáveis de Entrada das Tabelas 3.3, 3.4 e 3.5. Observe que neste exemplo a linha superior recebe a identificação de cada uma das Variáveis de Entrada. As linhas subsequentes representam as informações registradas no RTDS durante cada uma das simulações.

NUM	SECAO	DATA_HORA	DATA_HORA	TIPO	LOCAL	RES_FF	RES_FT	POW	CARGA	RA	RA_CLOSE	RA_RAS	RA_TMORTO
001	2.1	01/01/1999	11:59:31.004	BN	30%	5 OHMS	50 OHMS	45°	LEVE	SIM	1	SIM	500 ms
002	2.1	01/01/1999	11:59:31.004	AN	40%	5 OHMS	10 OHMS	60°	LEVE	SIM	1	SIM	500 ms
003	2.2	02/01/1999	11:59:31.005	CN	50%	5 OHMS	20 OHMS	90°	LEVE	SIM	1	SIM	500 ms
004	2.3	03/01/1999	11:59:31.006	ABN	60%	5 OHMS	40 OHMS	45°	LEVE	SIM	1	SIM	500 ms
005	2.4	04/01/1999	11:59:31.007	BCN	70%	5 OHMS	100 OHMS	60°	LEVE	SIM	1	SIM	500 ms
006	2.5	05/01/1999	11:59:31.008	CAN	80%	5 OHMS	50 OHMS	90°	LEVE	SIM	1	SIM	500 ms
007	2.6	06/01/1999	11:59:31.009	ABCN	100%	10 OHMS	50 OHMS	45°	LEVE	SIM	1	SIM	500 ms
008	2.7	07/01/1999	11:59:31.010	ABC	30%	10 OHMS	50 OHMS	60°	LEVE	SIM	1	SIM	500 ms
009	2.8	08/01/1999	11:59:31.011	BN	40%	10 OHMS	50 OHMS	90°	LEVE	SIM	1	SIM	500 ms
010	2.9	09/01/1999	11:59:31.012	AN	50%	10 OHMS	50 OHMS	45°	LEVE	SIM	1	SIM	500 ms
011	2.10	10/01/1999	11:59:31.013	CN	60%	10 OHMS	50 OHMS	60°	LEVE	SIM	1	SIM	500 ms
012	2.11	11/01/1999	11:59:31.014	ABN	70%	5 OHMS	50 OHMS	90°	LEVE	SIM	1	SIM	500 ms
013	2.12	12/01/1999	11:59:31.015	BCN	80%	5 OHMS	10 OHMS	45°	LEVE	SIM	1	SIM	500 ms
014	2.13	13/01/1999	11:59:31.016	CAN	30%	5 OHMS	20 OHMS	60°	LEVE	SIM	1	SIM	500 ms
015	2.14	14/01/1999	11:59:31.017	ABCN	40%	5 OHMS	40 OHMS	90°	LEVE	SIM	1	SIM	500 ms
016	2.15	15/01/1999	11:59:31.018	ABC	50%	5 OHMS	100 OHMS	45°	LEVE	SIM	1	SIM	500 ms
017	2.16	16/01/1999	11:59:31.019	BN	60%	5 OHMS	50 OHMS	60°	PESADA	SIM	1	SIM	500 ms
018	2.17	17/01/1999	11:59:31.020	AN	70%	10 OHMS	50 OHMS	90°	PESADA	SIM	1	SIM	500 ms
019	2.18	18/01/1999	11:59:31.021	CN	80%	10 OHMS	50 OHMS	45°	PESADA	SIM	1	SIM	500 ms
020	2.19	19/01/1999	11:59:31.022	ABN	30%	10 OHMS	50 OHMS	60°	PESADA	SIM	1	SIM	500 ms
021	2.20	20/01/1999	11:59:31.023	BCN	40%	10 OHMS	50 OHMS	90°	PESADA	SIM	1	SIM	500 ms
022	2.21	21/01/1999	11:59:31.024	CAN	50%	10 OHMS	50 OHMS	45°	PESADA	SIM	1	SIM	500 ms
023	2.22	22/01/1999	11:59:31.025	ABCN	60%	5 OHMS	50 OHMS	60°	PESADA	SIM	1	SIM	500 ms
024	2.23	23/01/1999	11:59:31.026	ABC	70%	5 OHMS	10 OHMS	90°	PESADA	SIM	1	SIM	500 ms
025	2.24	24/01/1999	11:59:31.027	BN	80%	5 OHMS	20 OHMS	45°	PESADA	SIM	1	SIM	500 ms
026	2.25	25/01/1999	11:59:31.028	AN	30%	5 OHMS	40 OHMS	60°	PESADA	SIM	1	SIM	500 ms
027	2.26	26/01/1999	11:59:31.029	CN	40%	5 OHMS	100 OHMS	90°	PESADA	SIM	1	SIM	500 ms
028	2.27	27/01/1999	11:59:31.030	ABN	50%	5 OHMS	50 OHMS	45°	PESADA	SIM	1	SIM	500 ms
029	2.28	28/01/1999	11:59:31.031	BCN	60%	10 OHMS	50 OHMS	60°	PESADA	SIM	1	SIM	500 ms
030	2.29	29/01/1999	11:59:31.032	CAN	70%	10 OHMS	50 OHMS	90°	PESADA	SIM	1	SIM	500 ms
031	2.30	30/01/1999	11:59:31.033	ABCN	80%	10 OHMS	50 OHMS	90°	PESADA	SIM	1	SIM	500 ms
032	2.31	31/01/1999	11:59:31.034	ABC	30%	10 OHMS	50 OHMS	90°	PESADA	SIM	1	SIM	500 ms
033	2.32	01/02/1999	11:59:31.035	ABN	40%	10 OHMS	50 OHMS	90°	PESADA	SIM	1	SIM	500 ms
034	2.33	02/02/1999	11:59:31.036	BCN	50%	5 OHMS	50 OHMS	90°	PESADA	SIM	1	SIM	500 ms
035	2.34	03/02/1999	11:59:31.037	CAN	60%	5 OHMS	10 OHMS	90°	PESADA	SIM	1	SIM	500 ms
036	2.35	04/02/1999	11:59:31.038	ABCN	70%	5 OHMS	20 OHMS	90°	PESADA	SIM	1	SIM	500 ms
037	2.36	05/02/1999	11:59:31.039	ABC	80%	5 OHMS	40 OHMS	90°	PESADA	SIM	1	SIM	500 ms
038	2.37	06/02/1999	11:59:31.040	BN	3630%	5 OHMS	100 OHMS	90°	PESADA	SIM	1	SIM	500 ms
039	2.38	07/02/1999	11:59:31.041	BN	3730%	5 OHMS	50 OHMS	90°	PESADA	SIM	1	SIM	500 ms
040	2.39	08/02/1999	11:59:31.042	BN	3830%	10 OHMS	50 OHMS	90°	PESADA	SIM	1	SIM	500 ms

Figura 4.2 - Exemplo Planilha de Resultados contendo as Variáveis de Entrada

As etapas seguintes desenvolvidas pelo grupo de trabalho do projeto de P&D, com a participação do autor desta monografia, estão relacionadas com a estrutura do software. Tais etapas se resumem na leitura da planilha de dados, processamento das informações e apresentação dos resultados.

O ambiente escolhido para o desenvolvimento do Software Análise de Resultados é o C++ através do software de programação RAD Studio 2010 da Embarcadero Technologies. O

trabalho de programação é conduzido pelo PROTLab com a supervisão dos participantes do projeto de pesquisa e desenvolvimento.

A seguir serão apresentadas as funcionalidades e estruturas previstas para o Software de Análise de Resultados.

4.2 Tela Inicial

A Figura 4.3 apresenta a visualização da tela inicial do Software de Análise de Resultados.

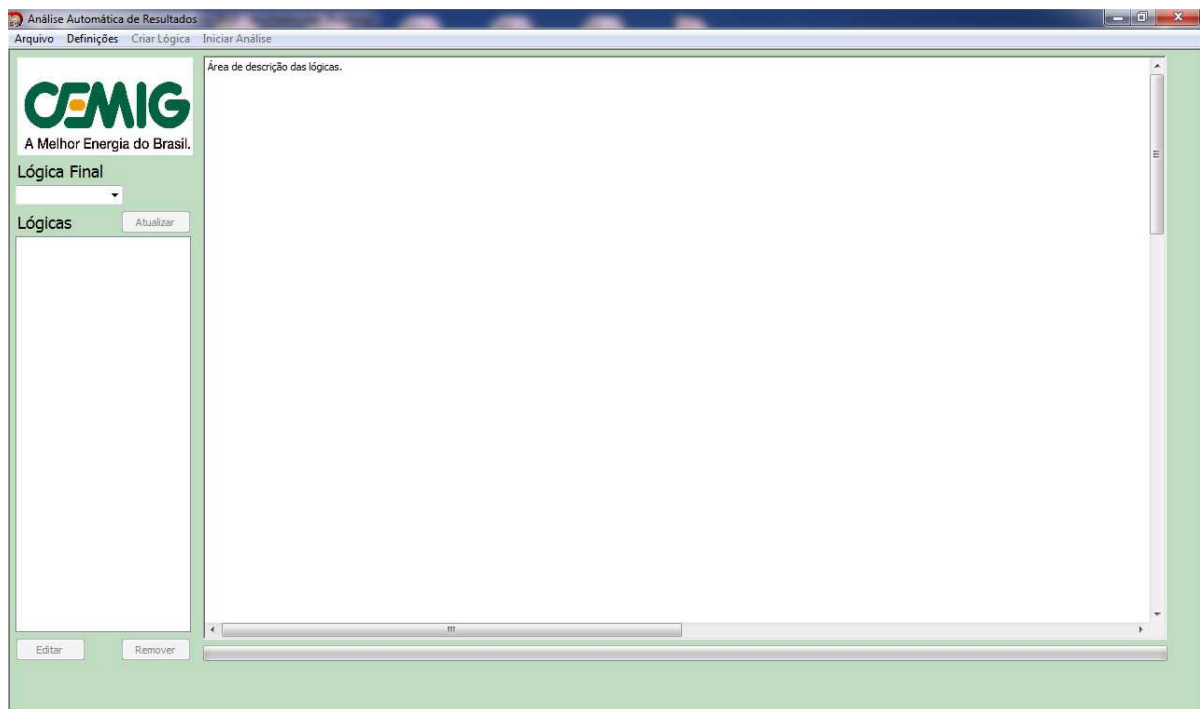


Figura 4.3 - Tela Inicial do Software de Análise de Resultados [PROTLAB, 2012]

Na parte superior da tela inicial estão os menus *Arquivo*, *Definições*, *Criar Lógica* e *Iniciar Análise*.

No menu *Arquivo* é possível a criação de um novo projeto de análise; salvar um projeto em andamento e abrir um projeto já iniciado.

O menu *Definições* é utilizado para a definição dos valores das Variáveis de Entrada do Software de Análise de Resultados, relacionadas com a Tabela 3.3 do Capítulo 3.

A criação das lógicas de avaliação está disponível no menu *Criar Lógica* enquanto que no menu *Iniciar Análise* a avaliação automatizada das simulações é iniciada.

Na parte central do programa está reservada uma área para visualização das lógicas de avaliação criadas no programa. Na parte esquerda entra-se o menu e a lista de navegação das lógicas criadas.

4.3 Leitura da Base de Dados Gerada pelo RTDS

A leitura da Base de Dados Gerada pelo RTDS é realizada no menu *Arquivo -> Criar Projeto -> Botão Localizar*. Uma janela de seleção de arquivos com extensão XLS é apresentada ao usuário para a localização e seleção do arquivo gerado pelo RTDS. A Figura 4.4 apresenta a tela de leitura da base de dados gerada pelo RTDS.

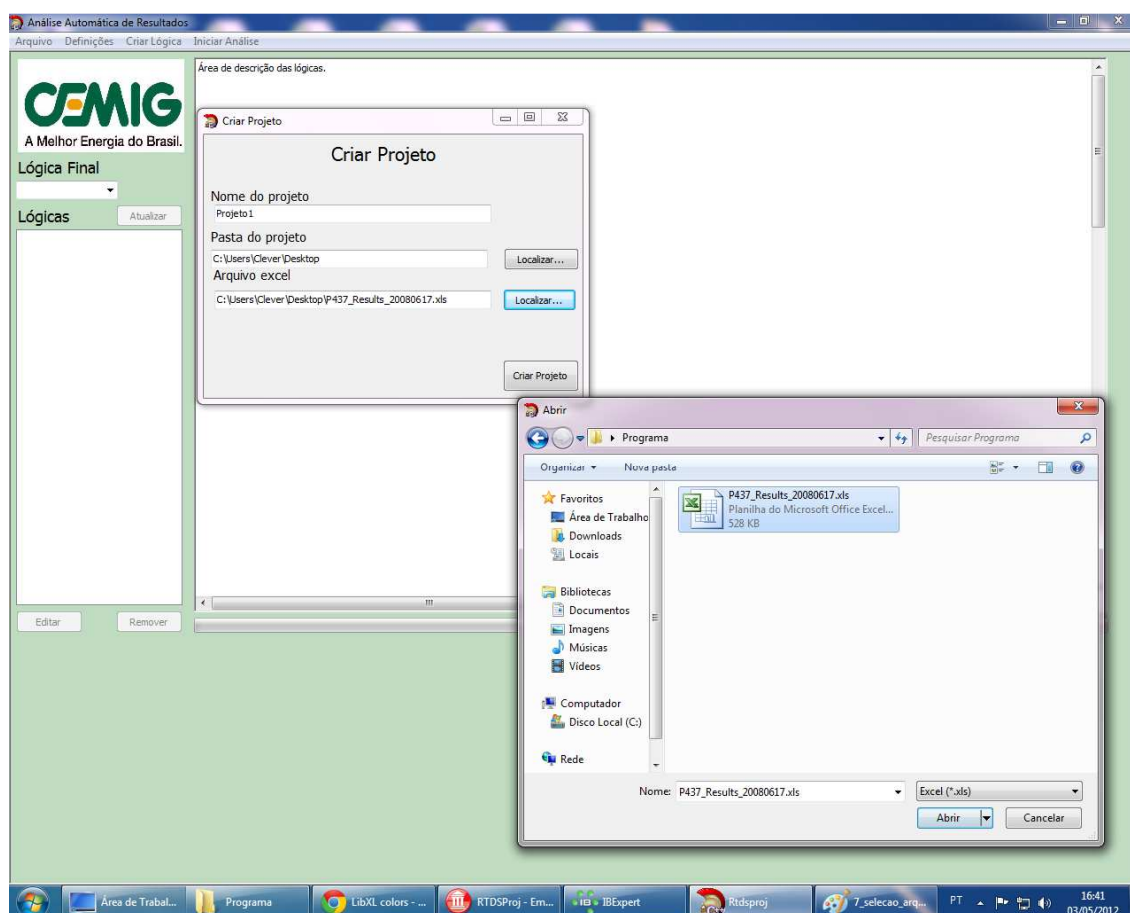


Figura 4.4 - Tela de Leitura dos Dados Gerados pelo RTDS [PROTLAB, 2012]

A partir do arquivo selecionado o Software de Análise de Resultados realiza a leitura de todas as Variáveis de Entrada registradas na base de dados do RTDS, transferindo as informações lidas para o novo projeto criado.

4.4 Edição das Lógicas de Avaliação das Simulações

A criação de uma nova lógica é realizada no menu *Criar Lógica*. Surge uma tela para criação das lógicas na qual é permitido ao usuário definir um nome para a lógica (por exemplo, o nome de um critério de avaliação), selecionar o operador lógico e cada uma das Variáveis de Entrada ou até mesmo as chamadas *Variáveis Lógicas*.

As Variáveis Lógicas são variáveis internas do Software de Análise de Resultados e resultam da criação de uma lógica de avaliação. Desta forma o nome dado à lógica criada é associado à Variável Lógica correspondente. Esta funcionalidade permite a criação de lógicas mais complexas por meio da associação em cascata das próprias lógicas criadas pelo usuário. Com isto é possível implementar no programa critérios de avaliação como os apresentados nas Figuras 3.16, 3.17 e 3.18 do Capítulo 3.

Dentro da janela de criação das lógicas é possível definir parâmetros matemáticos como equações, inequações, operadores matemáticos, etc. Estes recursos estão disponíveis no botão *Inserir Condição*.

Na parte central do programa é possível visualizar as lógicas criadas, bem como as condições estabelecidas para cada uma das variáveis utilizadas.

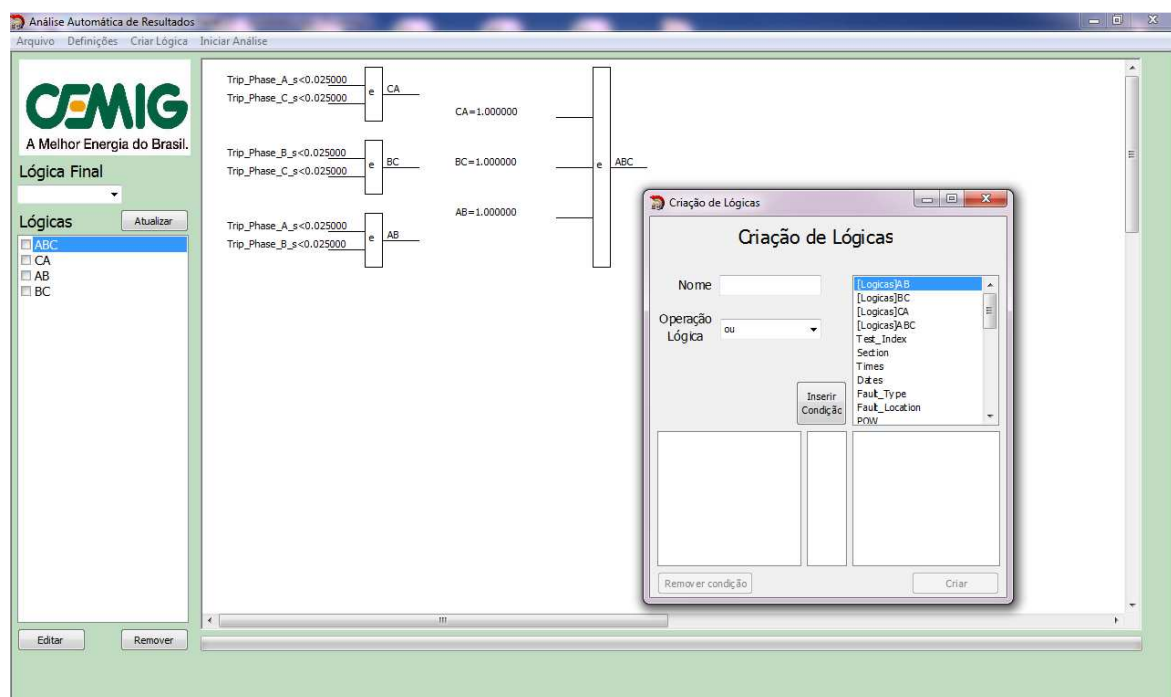


Figura 4.5 - Tela de Edição de Lógicas [PROTLAB, 2012]

À medida que vão sendo criadas novas lógicas, as mesmas são armazenadas pelo programa. Caso o usuário deseje editar uma lógica criada anteriormente é possível acessá-la na

área à esquerda do software, selecioná-la e clicar no botão *Editar*. É possível também a remoção das lógicas utilizando o botão *Remover*

4.5 Visualização dos Resultados da Análise Automática

Depois de estabelecidas as lógicas e os critérios torna-se possível a execução da avaliação automática das simulações. Para isto basta o usuário selecionar o menu *Iniciar Análise*.

O Software de Análise de Resultado executa uma varredura em todas as simulações registradas na base de dados e verifica todas as condições lógicas previamente estabelecidas.

O resultado da análise de cada simulação é disponibilizado na parte esquerda da tela do programa que apresenta uma listagem de todos os casos analisados e o resultado da avaliação.

Para todos os casos analisados é possível que o usuário visualize o estado de cada uma das condições de avaliação conforme apresentado na Figura 4.6. As condições indicadas em vermelho representam condições não satisfatórias enquanto que as condições indicadas em verde representam as condições satisfatórias.

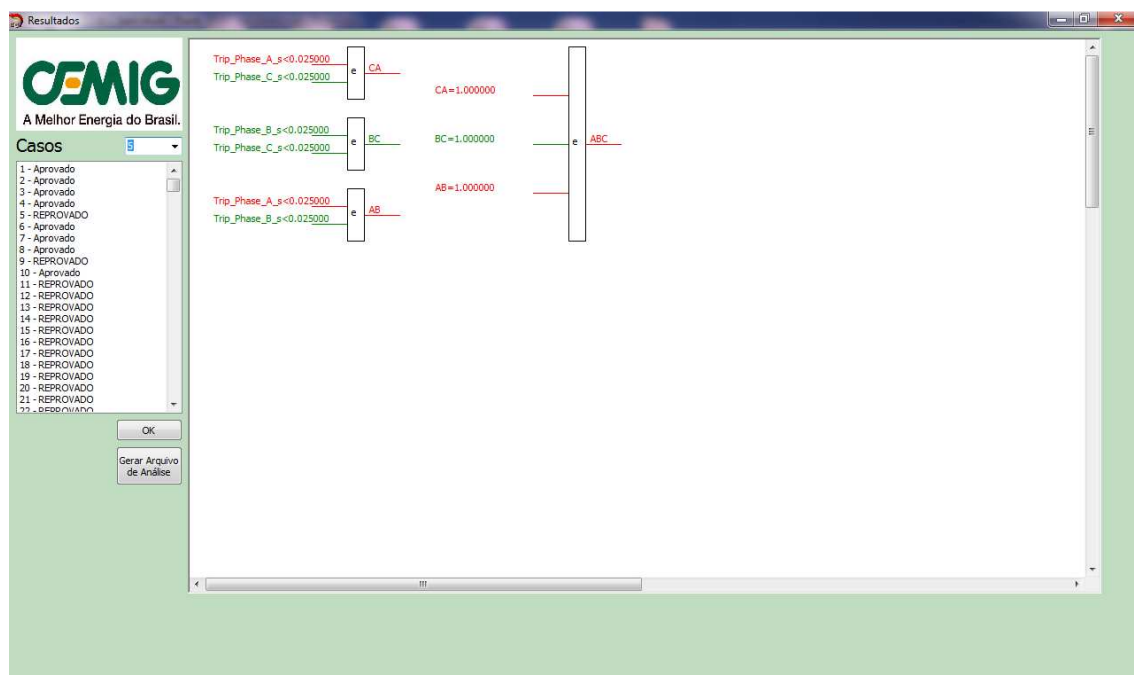


Figura 4.6 - Tela de Análise Detalhada dos Resultados [PROTLAB, 2012]

Esta funcionalidade permite ao usuário estudar pontualmente cada caso facilitando a identificação da origem de sua reprovação.

Outro recurso disponível no programa é a geração de uma planilha contendo todos os dados gerados pelo RTDS. O conteúdo é idêntico à planilha original lida pelo programa, porém agora os casos reprovados têm a sua linha correspondente destacada com uma cor diferente das linhas correspondentes aos casos aprovados.

A Figura 4.7 apresenta um exemplo de uma planilha de resultados gerada pelo Software de Análise de Resultados. As linhas destacadas na cor laranja representam os casos avaliados como “reprovados”.

Test Index	Section	Time	Date	Fault Type	Fault Location	POW	Ph-N Fault Resistance (ohms)	Ph-Ph Fault Resistance (ohms)	I1 (s)	I2 (s)	I3 (s)	Trip Phase A (s)	Trip Phase B (s)	Trip Phase C (s)	Z1 Trip (s)	Z2 Trip (s)	Z3 Trip (s)	GSCSG Trip (s)	PSIG Send (s)	PSIG Trip (s)	GSCSG Send (s)	GSCSG Trip (s)	Dist Fault Rev (s)	Dist Fault Fwd (s)	GFSC Fault Rev (s)	GFSC Fault Fwd (s)
1	4.2.1	174941	12/06/2008	AN	F1	0	0.01	-	0	0	0	0.022	0	0	0.025	0	0.065	0	0.021	0	0.013	0.983	0	0.025	0.104	0.017
2	4.2.1	175136	12/06/2008	AB	F1	0	-	0.01	0	0	0	0.019	0.019	0.019	0.023	0	0.061	0	0.017	0	0	0	0	0.022	0	0
3	4.2.1	175331	12/06/2008	BCN	F1	0	0.01	0.01	0	0	0	0.022	0.022	0.022	0.026	0	0.053	0.039	0.019	0	0.022	0	0	0.025	0	0.026
4	4.2.1	175530	12/06/2008	ABC	F1	0	-	0.01	0	0	0	0.023	0.023	0.023	0.027	0	0.06	0	0.023	0	0	0	0	0.026	0.076	0.088
5	4.2.1	07482176	39611	AN	F1	90	0.01	-	0	0	0	0.025	0	0	0.029	0	0.055	0	0.025	0	0.007	0.993	0	0.028	0.091	0.011
6	4.2.1	175919	12/06/2008	AB	F1	90	-	0.01	0	0	0	0.023	0.023	0.023	0.026	0	0.052	0	0.02	0	0	0	0	0.025	0	0
7	4.2.1	180114	12/06/2008	BCN	F1	90	0.01	0.01	0	0	0	0.023	0.023	0.023	0.027	0	0.053	0	0.023	0	0.023	0	0	0.026	0	0.027
8	4.2.1	084328	13/06/2008	ABC	F1	90	-	0.01	0	0	0	0.021	0.021	0.021	0.025	0	0.059	0	0.021	0	0	0	0	0.024	0.074	0.088
9	4.2.1	0753099	39611	AN	F2	0	0.01	-	0	0	0	0.028	0	0	0.031	0	0.058	0	0.024	0	0.015	0.982	0	0.031	0.084	0.019
10	4.2.1	180658	12/06/2008	AB	F2	0	-	0.01	0	0	0	0.024	0.024	0.024	0.027	0	0.053	0	0.022	0	0	0	0	0.027	0	0
11	4.2.1	0758169	39611	BCN	F2	0	0.01	0.01	0	0	0	0.026	0.026	0.026	0.03	0	0.056	0.056	0.023	0	0.026	0	0	0.029	0	0.03
12	4.2.1	07574884	39611	ABC	F2	0	-	0.01	0	0	0	0.028	0.028	0.028	0.032	0	0.065	0	0.023	0	0	0	0	0.031	0.081	0
13	4.2.1	07588194	39611	AN	F2	90	0.01	-	0	0	0	0.026	0	0	0.03	0	0.057	0	0.022	0	0.018	0.988	0	0.029	0.092	0.022
14	4.2.1	07601399	39611	AB	F2	90	-	0.01	0	0	0	0.026	0.026	0.026	0.029	0	0.055	0	0.024	0	0	0	0	0.028	0	0
15	4.2.1	07614816	39611	BCN	F2	90	0.01	0.01	0	0	0	0.026	0.026	0.026	0.029	0	0.056	0.056	0.023	0	0.026	0	0	0.029	0	0.03
16	4.2.1	07628099	39611	ABC	F2	90	-	0.01	0	0	0	0.027	0.027	0.027	0.031	0	0.063	0	0.022	0	0	0	0	0.03	0.079	0
17	4.2.1	07641204	39611	AN	F3	0	0.01	-	0	0	0	0.035	0	0	0	0	0.066	0.039	0.027	0	0.017	1.008	0	0.038	0.093	0.021
18	4.2.1	0765463	39611	AB	F3	0	-	0.01	0	0	0	0.043	0.043	0.043	0	0	0.046	0	0.025	0	0	0	0	0.046	0	0
19	4.2.1	07667824	39611	BCN	F3	0	0.01	0.01	0	0	0	0.044	0.044	0.044	0	0	0.047	0.047	0.026	0	0.044	0	0	0.047	0	0.048
20	4.2.1	0768125	39611	ABC	F3	0	-	0.01	0	0	0	0.049	0.049	0.049	0	0	0.052	0	0.024	0	0	0	0	0.052	0	0
21	4.2.1	07694444	39611	AN	F3	90	0.01	-	0	0	0	0.037	0	0	0	0	0.054	0.04	0.028	0	0.015	1	0	0.04	0.104	0.019
22	4.2.1	0770787	39611	AB	F3	90	-	0.01	0	0	0	0.043	0.043	0.043	0	0	0.046	0	0.024	0	0	0	0	0.046	0	0
23	4.2.1	07721065	39611	BCN	F3	90	0.01	0.01	0	0	0	0.05	0.05	0.05	0	0	0.053	0.053	0.025	0	0.05	0	0	0.053	0	0.054
24	4.2.1	07734491	39611	ABC	F3	90	-	0.01	0	0	0	0.059	0.059	0.059	0	0	0.062	0	0.027	0	0	0	0	0.045	0	0
25	4.2.2	07747685	39611	AN	F1	0	100	-	0	0	0	0.046	0	0	0	0	0	0.049	0.024	0	0.022	1.002	0	0.049	0.114	0.025
26	4.2.2	0775787	39611	BN	F1	0	100	-	0	0	0	0.049	0	0	0	0	0	0.052	0.029	0	0.008	1.019	0	0.052	0.106	0.012
27	4.2.2	0776794	39611	CN	F1	0	100	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0.049	0.025	0	0.021	1.008	0	0.049	0.114	0.025	
28	4.2.2	184030	12/06/2008	AB	F1	0	-	10	0	0	0	0.021	0.021	0.021	0.025	0	0.062	0	0.022	0	0	0	0	0.024	0	0
29	4.2.2	184225	12/06/2008	BCN	F1	0	20.01	0.02	0	0	0	0.021	0.021	0.021	0.025	0	0.052	0	0.019	0	0.021	0	0	0.024	0	0.025
30	4.2.2	184421	12/06/2008	ABC	F1	0	-	15	0	0	0	0.021	0.021	0.021	0	0	0.058	0	0.021	0	0	0	0	0.024	0.074	0
31	4.2.2	07821644	39611	AN	F1	90	100	-	0	0	0	0.045	0	0	0	0	0	0.048	0.022	0	0.02	0.998	0	0.048	0.116	0.024
32	4.2.2	07831713	39611	BN	F1	90	100	-	0	0	0	0	0.055	0	0	0	0	0.058	0.026	0	0.006	1.025	0	0.058	0.113	0.01
33	4.2.2	07841782	39611	CN	F1	90	100	-	0	0	0	0	0	0	0.052	0	0	0.055	0.025	0	0.02	1.032	0	0.055	0.11	0.024
34	4.2.2	185108	12/06/2008	AB	F1	90	-	10	0	0	0	0.021	0.021	0.021	0.025	0	0.063	0	0.018	0	0	0	0	0.024	0	0
35	4.2.2	07868287	39611	BCN	F1	90	20.01	0.02	0	0	0	0.026	0.026	0.026	0.03	0	0.056	0.043	0.027	0	0.008	0	0	0.029	0	0.012
36	4.2.2	185457	12/06/2008	ABC	F1	90	-	15	0	0	0	0.02	0.02	0.02	0.023	0	0.056	0	0.017	0	0	0	0	0.023	0.073	0
37	4.2.2	07894907	39611	AN	F2	0	100	-	0	0	0	0.04	0	0	0	0	0	0.043	0	0	0.024	0.98	0	0	0.098	0.028
38	4.2.2	07905093	39611	BN	F2	0	100	-	0	0	0	0.034	0	0	0	0	0	0.037	0	0	0.015	0.968	0	0	0.095	0.019
39	4.2.2	03803472	39612	CN	F2	0	100	-	0	0	0	0	0	0	0.061	0	0	0.059	0.12	0	0.016	0.982	0	0	0.141	0.02
40	4.2.2	190141	12/06/2008	AB	F2	0	-	10	0	0	0	0.023	0.023	0.023	0.027	0	0.052	0	0.021	0	0	0	0	0.026	0	0
41	4.2.2	07941951	39611	BCN	F2	0	20.01	0.02	0	0	0	0.026	0.026	0.026	0.029	0	0.056	0.056	0.024	0	0.025	0	0	0.028	0	0.029
42	4.2.2	07954991	39611	ABC	F2	0	-	15	0	0	0	0.028	0.028	0.028	0.031	0	0.064	0	0.022	0	0	0	0	0.03	0.08	0
43	4.2.2	07969171	39611	AN	F2	90	100	-	0	0	0	0.062	0	0	0	0	0	0.06	0.113	0	0.019	0.971	0	0	0.142	0.023
44	4.2.2	07976241	39611	BN	F2	90	100	-	0	0	0	0.063	0	0	0	0	0	0.06	0	0	0.02	0.983	0	0	0.129	0.025
45	4.2.2	07989426	39611	CN	F2	90	100	-	0	0	0	0	0	0	0.04	0	0	0.043	0	0	0.021	0.967	0	0	0.101	0.025
46	4.2.2	08001968	39611	AB	F2	90	-	10	0	0	0	0.025	0.025	0.025	0.029	0	0.054	0	0.022	0	0	0	0	0.028	0	0

Figura 4.7 - Planilha de Resultados Gerados pelo Software de Análise de Resultados [PROTLAB, 2012]

5 Conclusões e Propostas de Continuidade

5.1 Conclusões

As primeiras avaliações automáticas realizadas mostraram que o software de Análise de Resultados representa um grande avanço na etapa final de um ensaio em modelo. Com esta ferramenta será possível identificar os pontos críticos das simulações de um ensaio em modelo com uma velocidade muito superior aos métodos atuais de análise.

Durante o processo de análise convencional é plausível a ocorrência de erros durante a avaliação do engenheiro responsável. Em um único ensaio de modelo são geradas centenas podendo alcançar milhares de simulações, dependem do rigor do teste e da importância do equipamento no sistema ao qual o mesmo será inserido. Para cada simulação são monitoradas várias informações dos relés de proteção e do próprio RTDS o que multiplica o volume de dados para análise. Isto exige do engenheiro responsável uma avaliação muito criteriosa e sistemática, o que eleva o custo da etapa de análise devido à utilização de um número elevado de homens-hora de engenharia.

Atualmente as conexões entre as saídas de um relé de proteção e o RTDS são físicas, ou seja, utilizando os contatos de saídas digitais dos relés de proteção conectadas a entradas digitais do RTDS. Isto restringe o número de pontos monitorados devido a limitações destas entradas e saídas digitais dos equipamentos. Com a utilização de protocolos de comunicação da norma IEC 61850 é possível adquirir uma grande quantidade de informações dos relés de proteção, o que gera um número muito maior de variáveis na base de dados do RTDS. Portanto, com a utilização do Software de Análise Automática é possível avaliar as novas variáveis sem afetar o desempenho do programa.

A automação do processo de análise permite que seja especificado um número cada vez maior de simulações e de pontos monitorados para um mesmo ensaio em modelo. Testes que antes não eram realizados devido a restrições de tempo e custos tornam-se viáveis com o uso da

ferramenta computacional. Isto faz com o que o RTDS e os relés de proteção avaliados sejam levados ao seu limite, permitindo ao usuário identificar pontos críticos e limitações ainda não observados e corrigi-los antes da entrada em operação do equipamento protegido. O resultado é um ganho de confiabilidade cada vez maior para o sistema de proteção e consequentemente para o equipamento protegido.

O ganho maior do projeto de pesquisa e desenvolvimento, considerando suas etapas de *Modelagem e Redução de um Sistema Elétrico*, *Execução de Simulações* e *Análise de Resultados* é tornar acessível a realização de ensaios de modelo para um número cada vez maior de equipamentos e seus sistemas, antes não avaliados por este tipo de ensaio devido a restrições orçamentárias e de tempo.

5.2 *Propostas de Continuidade*

O Software de Análise de Resultados encontra-se em fase de desenvolvimento e, portanto, não foi submetido a uma avaliação de um ensaio de modelo real. Apesar dos bons resultados iniciais é necessário consolidar seus recursos antes de submeter o programa a uma bateria de testes envolvendo casos reais. Tais recursos são: a edição das lógicas de avaliação, a visualização dos resultados da análise e a planilha de resultados gerada a partir do programa.

Neste trabalho de monografia foram definidos os critérios para avaliação de um único caso do roteiro de testes de um ensaio em modelo de uma linha de transmissão, que são as *Faltas Internas em uma Linha de Transmissão com Religamento Automático Satisfatório*. Tais critérios, definidos sob a forma de lógicas, deverão ser consolidados durante a execução de uma análise real utilizando o Software de Análise de Resultados.

Conforme mencionado no parágrafo anterior foram definidos os critérios para um único caso, porém, um ensaio de modelo completo é constituído por um conjunto de casos. Portanto torna-se necessário trabalhar os demais casos, dentre os quais pode-se citar:

- a) Faltas Internas em uma Linha de Transmissão com Religamento Automático Não Satisfatório;
 - b) Faltas Internas em uma Linha de Transmissão com Religamento Automático Não Satisfatório;
 - c) Faltas Evolutivas em uma Linha de Transmissão;
 - d) Faltas Internas com o Terminal Remoto Aberto
-

- e) Faltas Externas com tempo de duração igual ou inferior a 100 milissegundos
- f) Faltas Externas com tempo de duração superior a 100 milissegundos
- g) Energização da Linha de Transmissão sob Falta
- h) Oscilação de Potência Estável
- i) Oscilação de Potência Instável
- j) Falha no Circuito de Potencial dos Relés de Proteção (Falha de Fusível)

A especificação dos casos é objeto de estudo da segunda parte do projeto de pesquisa, *Execução de Simulações*, que também se encontra em fase de estudo e desenvolvimento.

Além dos Sistemas de Proteção de Linhas de Transmissão este trabalho de monografia poderá ser estendido a outros Sistemas de Proteção como, por exemplo, a Proteção de Barramentos, Transformadores, Reatores, Banco de Capacitores e Geradores, sendo este último objeto de estudo de outra frente de trabalho do grupo de trabalho do projeto de P&D.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AREVA. MICOM P437 Distance Protection Device Technical Manual, 2011.

AQUINO, Ricardo; VALE, Maria. Impacto da Parcela Variável na Expansão, Operação e Manutenção do Sistema Interligado Nacional – Propostas para Atualização de Procedimentos. In: ERIAC, 13., Puerto Iguazú, 2009.

CEMIG. Planilha de Resultados de Ensaio de Modelo de Proteção de Linha de Transmissão. Belo Horizonte, 2008.

DISTANCE PROTECTION SCHEMES. Disponível em www.fecime.org/referencias/npag/chap12-192-201.pdf. Acesso em 01/05/2012.

ELETROSUL CENTRAIS ELÉTRICAS S.A. Roteiro de Faltas – Ensaio de Modelo para Relé de Proteção de Linha, 2006.

GE INDUSTRIAL SYSTEMS. D60 Line Distance Protection System – UR Series Instruction Manual. Ontario, 2009.

ONS, Submódulo 2.6 do Procedimento de Rede: Requisitos Mínimos para os Sistemas de Proteção e de Telecomunicações, Disponível em www.ons.com.br. Acesso em 01 de maio 2012.

PEREIRA, Clever. Proteção Digital: Hardware dos Relés Numéricos. Belo Horizonte, 2011.

PEREIRA, Clever. Proteção de SEP: Proteção de Distância. Belo Horizonte, 2011.

PROTLAB. Software de Análise de Resultados. Belo Horizonte, 2012.

RTDS TECHNOLOGIES. Real Time Digital Simulator. Disponível em www.rtds.com. Acesso em 01 de maio 2012.

SIEMENS, SIPROTEC Distance Protection 7SA6 V4.70 Manual. 2011.

SIEMENS, SIPROTEC Differential Protection 7SD610 V4.70 Manual. 2011.

WANG, Mark; CHEN, Yong. Weak Infeed Study and Protection Solution. In: WESTERN PROTECTIVE RELAY CONFERENCE, 38., 2011, Washington, 2011.
