

Simulação da Proteção de Geradores Considerando a Dinâmica Eletromecânica

D.M. Falcão¹ G.N. Taranto¹ T.M.L. Assis¹ J.M.T. Marinho¹ R.C. de Carvalho¹

D.R. Parrini¹ T.M. Valentini¹ S.L. Escalante² S.T. da Silva³ C.J.C. de Souza³

¹COPPE/UFRJ

²UERJ

³Light Energia

Resumo – Este trabalho apresenta uma metodologia de simulação baseada na modelagem da dinâmica eletromecânica do sistema elétrico que permite a avaliação do desempenho dos sistemas de proteção dos geradores, levando em consideração os fenômenos dinâmicos de interesse na faixa de atuação dos equipamentos de proteção e com requisitos computacionais adequados para análise integrada do sistema de geração, transmissão e distribuição. A metodologia foi implementada e testada em um software de simulação da dinâmica eletromecânica do sistema elétrico, incluindo os geradores e seus controladores. Nesses testes foram utilizados dados de uma usina real e um equivalente do sistema interligado nacional.

Palavras-chave – Proteção, geradores, simulação, dinâmica eletromecânica.

I. INTRODUÇÃO

Os sistemas geradores apresentam alta complexidade para monitoração e operação pois cada sistema tem características próprias e variáveis de acordo com o modelo de equipamento, sua vida útil, potência de defeito, sistema ao qual está conectado e regime de operação. Para monitorar e proteger cada unidade geradora são empregados um número elevado de equipamentos. Adicionando-se às proteções utilizadas para o conjunto gerador, excitatriz, transformador de força e de campo e disjuntores, este número é ainda maior. Como na grande maioria destes equipamentos a característica de operação pode variar desde o acionamento de um equipamento regulador até a completa parada e desconexão do gerador do sistema, fica muito difícil garantir que cada equipamento de proteção opere unicamente dentro de sua zona de proteção, não invadindo a zona de proteção de outro equipamento ou mesmo operando com a devida seletividade.

Elaborar ajustes para garantir uma operação conjunta, seletiva e coordenada é uma função muito complexa, onde muitas vezes somente a análise pós-operação permite identificar desligamentos indevidos. Tal situação poderá causar uma parada brusca dos geradores, provocando danos aos mesmos e oscilações no sistema, interferindo até mesmo na operação de outras máquinas conectadas ao sistema. Em caso de danos aos equipamentos de geração, há situações onde a correção demanda dias ou semanas, pois o reparo destes equipamentos é muitas vezes onerosa e de difícil execução.

Por essas razões, a existência de uma ferramenta computacional capaz de simular o funcionamento do sistema

de proteção das usinas geradoras, incluindo o efeito de perturbações no sistema elétrico ao qual as mesmas estão conectadas, certamente é de grande utilidade para garantir a correta operação da proteção nas diversas condições possíveis de ocorrer na prática. Uma ferramenta desse tipo pode ser capaz de detectar falhas no sistema de proteção, não facilmente identificáveis através de processos convencionais de projeto e ajustes da proteção.

A literatura técnica especializada apresenta alguns trabalhos no tema abordado neste artigo. A maioria desses trabalhos utiliza um processo de simulação em regime permanente do sistema elétrico para calcular as correntes e tensões ocasionadas pelos defeitos na rede, como aqueles apresentados nas referências [1] e [2]. Essas abordagens não permitem a avaliação da influência de fenômenos dinâmicos de curta e longa duração no sistema de proteção dos geradores.

Uma outra linha de pesquisa utiliza simuladores digitais da dinâmica eletromagnética, como o EMTP ou ATP, para levar em consideração os fenômenos de alta frequência presentes nos primeiros instantes das operações de chaveamento. Um exemplo desse tipo de simulação encontra-se em [3]. Esse tipo de simulador, embora útil para alguns estudos específicos, exige esforço computacional elevado, tornando inviável a representação mais detalhada das redes de subtransmissão e transmissão, e dos demais geradores da área em análise.

Encontram-se, também, na literatura relatos de simuladores de sistemas de proteção utilizando Simuladores Digitais em Tempo Real, do tipo RTDS, tal como aquele descrito em [4]. Esse tipo de simulação, baseado em hardware especializado é muito caro e exige habilidade específica para sua utilização.

Finalmente, em [5] encontra-se o relato da utilização da modelagem eletromecânica do sistema elétrico para desenvolver estudos de simulação da proteção de geradores, ainda que neste trabalho os aspectos estudados tenham sido bastante limitados.

Este artigo apresenta uma metodologia de simulação, baseada na modelagem da dinâmica eletromecânica do sistema elétrico que permite a avaliação do desempenho dos sistemas de proteção dos geradores, levando em consideração os fenômenos dinâmicos de interesse na faixa de atuação dos equipamentos de proteção e com requisitos computacionais adequados para análise integrada do sistema de geração, transmissão e distribuição. A metodologia foi implementada e

testada em um software de simulação da dinâmica eletromecânica do sistema elétrico, incluindo os geradores e seus controladores, descrito em [6]. Nesses testes foram utilizados dados de uma usina real e um equivalente do sistema interligado nacional.

II. METODOLOGIA DE SIMULAÇÃO

A dinâmica eletromecânica do sistema elétrico modela os fenômenos transitórios que ocorrem no sistema em função das oscilações dos rotores das máquinas rotativas em resposta a perturbações causadas por variações na carga, na rede elétrica ou nos próprios geradores. Dentre esses fenômenos, destacam-se os curto-circuitos, perturbações para as quais os sistemas de proteção são especialmente projetados. Esses fenômenos ocorrem no intervalo de milissegundos até minutos, sendo aqueles mais importantes para estudos de proteção situado em uma faixa de poucos segundos,

Na simulação da dinâmica eletromecânica são modelados detalhadamente a dinâmica dos geradores e seus controladores, das cargas e demais dispositivos de controle disponíveis no sistema elétrico, desde que suas respostas se encontram na faixa de interesse dos estudos. A rede elétrica é suposta em regime permanente tendo em vista que os transitórios exclusivamente elétricos são muito rápidos quando comparado com os acima referidos.

O modelo matemático utilizado no processo de simulação é apresentado a seguir:

$$\dot{x} = f(x, y) \quad (1)$$

$$0 = g(x, y) \quad (2)$$

onde

x : é o vetor das variáveis de estado associadas aos modelos das máquinas e seus controladores;

y ; é o vetor das variáveis algébricas associadas à rede elétrica e aos estatores das máquinas rotativas.

No modelo de simulação utilizado neste trabalho, os modelos representados por (1) e (2) podem ser formulados em uma representação trifásica, de sequência positiva ou mista, como apresentado em [7]. Em geral, os modelos trifásicos são utilizados para representar a região próxima aos geradores em estudo e a representação de sequência positiva para a parte do sistema eletricamente distante dessa área.

III. MODELAGEM COMPUTACIONAL DOS RELÉS DE PROTEÇÃO

A estrutura computacional básica do relé de proteção utilizado neste trabalho está mostrada na Figura 1. Deste modelo, denominado Relé Base, derivam todos os outros modelos de relés, por meio da adição de uma ou mais funções de proteção.

O relé se conecta a um disjuntor, ao qual envia sinais de abertura e fechamento. A variável interna *close* pode se conectar internamente a outros blocos de função para enviar um sinal de fechamento ao disjuntor, como ocorre, por exemplo, com o uso da função de proteção 25 (verificação de sincronismo). A variável *trip* faz o mesmo para o sinal de abertura, sendo, porém controlada pela variável *block*, que tem a função de bloquear o sinal de abertura para certas condições,

como ocorre, por exemplo, com o uso da função de proteção 67 (direcional). As variáveis *t-trip* e *t-block* fazem o mesmo para sinais externos ao modelo base, permitindo que o relé receba sinais de atuação e bloqueio remotos.

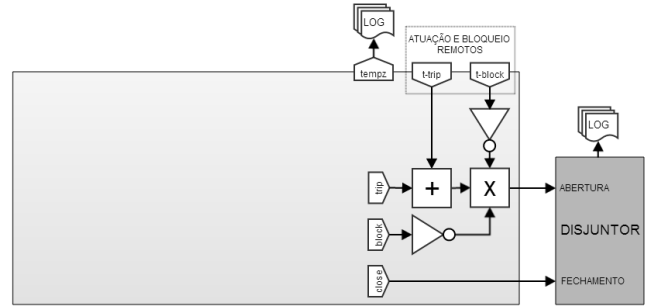


Figura 1. Estrutura computacional base do relé

A variável *tempz* se conecta internamente a blocos de função para indicar por meio de evento de log uma condição de sensibilização do relé, por exemplo quando uma grandeza monitorada ultrapassa o seu valor de pick-up. Por sua vez, o disjuntor também envia ao ambiente de simulação eventos de log de abertura e fechamento. O relé pode ser configurado com três modos de operação: o de atuação, onde os sinais de abertura e fechamento efetivamente operam o disjuntor, o de monitoração, onde somente um evento de log é gerado e o disjuntor não opera (mensagem “teria operado o relé de proteção xyz”), e o modo de alarme.

Neste trabalho, a abordagem de um conjunto de funções de proteção não é a de um “relé multifunção”, se assemelhando mais à aplicação do relé convencional eletromecânico, onde uma unidade de relé deve ser empregada separadamente para cada função de proteção, cada uma das fases, rede de sequência, e para operação em alarme ou trip.

Foram implementados várias representações de dispositivos de proteção baseados no modelo acima. A seguir, como exemplos ilustrativos, são apresentados os modelos desenvolvidos para o Relé de Sobrecorrente Instantâneo, o Relé de Distância e o Relé de Verificação de Sincronismo.

A. Relé de Sobrecorrente Instantâneo (50)

A Figura 2 apresenta o modelo completo do relé de sobrecorrente instantâneo (função 50), que também permite representar um relé de tempo definido (temporização fixa). O parâmetro *Tr* pode assumir um valor nulo (relé instantâneo) ou não-nulo, para modelar qualquer retardo não intencional (tempo para início de abertura de contato de disjuntores e tempo de eliminação do arco elétrico nos contatos) ou mesmo um retardo intencional (relé de temporização fixa).

Um modelo de TC acoplado ao relé se conecta a um ramo da rede elétrica, que pode ser um dispositivo shunt ou série. Para o caso do relé 50, o TC pode ser configurado para medir e entregar ao relé um valor de corrente de qualquer das fases (A, B, C) ou rede de sequência (“+”, “-”, “0”), ou ainda a corrente de retorno obtida pelo somatório das correntes nas três fases (“N” ou neutro implícito). Essencialmente o modelo de TC empregado tem a função de um transdutor de correntes, podendo representar um ou mais transformadores de corrente fisicamente acoplados ao relé. A corrente *I* assim obtida é

comparada com o valor do parâmetro pickup. Quando ultrapassado este valor, é gerado um evento de log de sensibilização do relé e começa no bloco *Delay* a contagem do tempo T_r para a efetivação do trip. Se durante este intervalo a corrente retornar a um valor inferior ao de pick-up, o relé sofre o reset e o trip não ocorre.

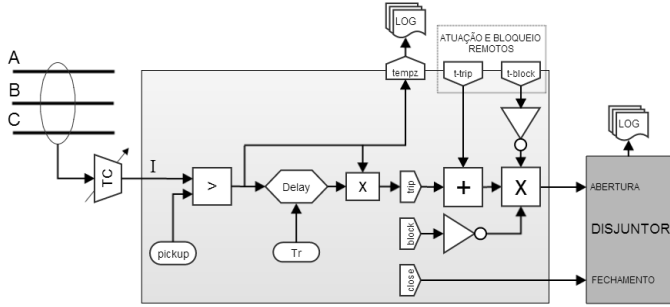


Figura 2. Estrutura computacional do relé de sobrecorrente

B. Relé de Distância (21)

A Figura 3 apresenta o modelo desenvolvido para o relé de distância. Os transdutores de tensão e corrente configuráveis entregam ao relé os fasores tensão e corrente medidos em um ponto do sistema elétrico, sendo então computada a impedância complexa Z vista a partir deste ponto. Uma impedância Z_o ($R_o + jX_o$) definida como parâmetro é subtraída da impedância Z , e o módulo da impedância resultante é comparado com o valor de pick-up. Para valores menores que o do parâmetro pickup, o relé opera com característica de tempo definido pelo parâmetro T_r . A Figura 4 mostra o diagrama de operação do relé de distância. A região de operação é definida no plano $R-X$ como um círculo com centro em (R_o, X_o) e raio igual ao parâmetro de pickup.

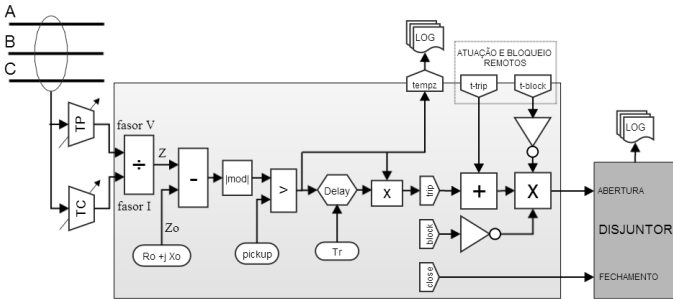


Figura 3. Estrutura computacional do relé de distância

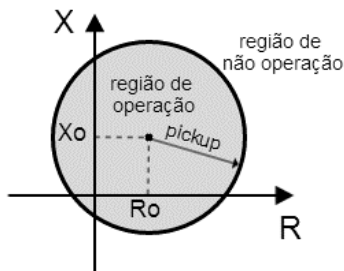


Figura 4. Diagrama de operação do relé de distância

C. Relé de Verificação de Sincronismo (25)

A Figura 5 mostra o modelo do relé de verificação de sincronismo. O relé utiliza dois transdutores de tensão TP1 e TP2 conectados nos lados de um disjuntor inicialmente aberto e que será fechado somente quando houver condição de sincronismo entre os terminais. Os TPs são previamente configurados para medir a tensão de sequência positiva. A condição de sincronismo é obtida quando a magnitude da diferença entre as tensões V_2 e V_1 for menor que um valor pré-estabelecido, e permanecer assim por um intervalo de tempo suficiente para garantir o fechamento seguro do disjuntor. Graficamente, como ilustrado na Figura 6, quando o fasor V_2-V_1 permanecer dentro do círculo de raio igual ao parâmetro pick-up, pelo tempo T_r .

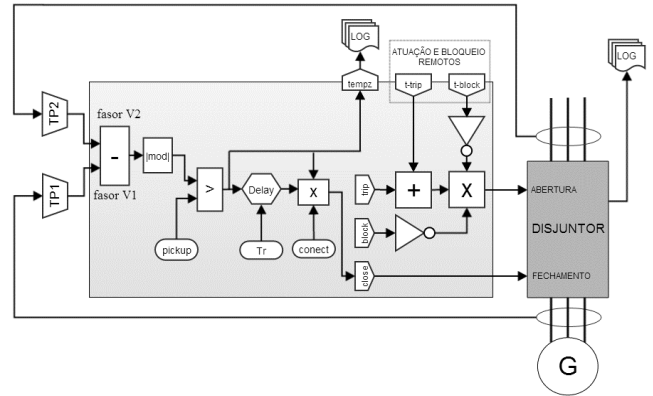


Figura 5. Estrutura computacional do relé de verificação de sincronismo

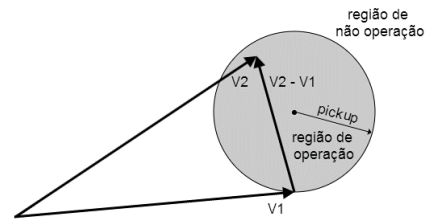


Figura 6. Diagrama de operação do relé de verificação de sincronismo

IV. IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL

A metodologia de simulação da proteção de geradores foi implementada em uma plataforma de simulação da dinâmica eletromecânica desenvolvido utilizando-se a técnica de Modelagem Orientada a Objetos. Nesta plataforma, o sistema elétrico é modelado de forma muito próxima ao sistema físico, com representação detalhada da topologia da rede através da localização exata de chaves e disjuntores, sendo os componentes do sistema definidos pelo usuário, o que permite uma grande flexibilização na introdução de novos componentes [8]-[9]. Em particular, na aplicação descrita neste artigo, essa facilidade foi de fundamental importância na modelagem dos dispositivos de proteção, como descrito na seção seguinte.

A plataforma computacional desenvolvida é composta de dois módulos principais: *Simprot*, incluindo a interface com usuários e os modelos de dispositivos de proteção; *Simulight*,

incluindo a máquina de cálculo da simulação eletromecânica do sistema elétrico e a interface para inclusão dos dados da simulação e exibição de resultados. A integração desses módulos é mostrada na Figura 7.

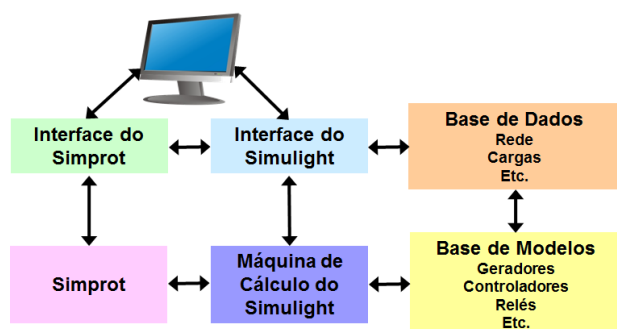


Figura 7. Integração do modelo computacional

V. CASO TESTE

A metodologia apresentada neste artigo foi testada utilizando dados reais de uma usina da Light Energia, do sistema elétrico da Light S.E.S.A. e do Sistema Interligado Nacional. A usina escolhida para o teste foi a usina Fontes Nova.

A usina Fontes Nova está localizada no Município de Pirai, estado do Rio de Janeiro, e entrou em operação na década de 1940. Sua capacidade instalada é de 132 MW. A usina conta com três turbinas idênticas, de mesma capacidade, do tipo Francis de eixo vertical, com potência nominal unitária de 44,87 MW cada. Os geradores A e C, com capacidade de 51,76 MVA cada um, possuem as mesmas características e fabricantes diferentes. O gerador B, após reforma em 1999, teve a potência aparente ampliada para 62 MVA.

A. Sistema Elétrico Equivalente

Para a realização dos estudos de simulação foi estabelecido um equivalente do SIN e do sistema elétrico da Light. Neste caso, a representação do sistema elétrico da Light foi mantida inalterada, ou seja, na sua representação completa, sendo a técnica de equivalente aplicada apenas ao SIN, do qual foi retido apenas a parte mais próxima eletricamente do sistema da Light e da usina em análise.

O sistema equivalente está mostrado na Figura 8, na qual os círculos azuis representam as injeções equivalentes nas barras de fronteira, cujos valores são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Injeções equivalentes nas barras de fronteira do equivalente

Área	Subestação	Barra	Injeção Equivalente (MVA)
Furnas	Vitoria	149 VITORIA--345	-197+j272
	Cachoeira Paulista	104 C.PAULIS-500	3346-j135
	Adrianópolis	140 ADRIANO--345	561-j35
	Viana	2619 VIANA---138	-192-j150
A Licitar	Viana	3021 VIANA2---500	455+j114
Demais Agentes RJ/ES	Nova Iguaçu	9608 N.IGUACU-500	1191+j20
CTEEP - Grande São Paulo	Santa Cabeça	461 S.CABECA-230	97-j22
Energisa	Além Paraíba	3300 APARAIBA-138	-30+j3

A Tabela 2 apresenta uma comparação das dimensões do sistema equivalente com a representação do sistema original, obtido do banco de dados do Operador Nacional do Sistema Elétrico, na qual fica evidente a redução dessa dimensão, permitindo simulações mais rápidas dos casos analisados, sem perda significativa na qualidade dos resultados, pois a parte não representada do SIN encontra-se eletricamente distante da usina em estudo.

Tabela 2. Comparação das dimensões do equivalente e do SIN.

Descrição	Quantidade		
	SIN	Equivalente	
Parâmetro			
Número de ilhas ativas	1	1	
Número de barras (em ilhas ativas)	5629	485	8,62%
Número de barras de fronteira	---	8	
Número de barras de geração	1035	19	1,84%
Número de barras de carga	2238	226	10,10%
Número de linhas de transmissão	5003	1016	20,31%
Número de transformadores (incluindo LTCs)	3060	177	5,78%
Geração total (incluindo balanço de injeções de fronteira)	92154 MW	9662 MW	10,49%
Carga total	84489 MW	9492 MW	11,24%
Perda total	7665 MW	170 MW	2,22%

B. Sistema de Proteção da Usina

Os dispositivos de proteção considerados em operação na usina Fontes Nova, unidades A e C, foram os seguintes:

- Relé tipo DGP (fabricação GE)
 - Proteção contra sequência negativa (46)
 - Proteção contra perda de excitação (40)
 - Proteção contra reversão de potência (32)
 - Proteção de sobrecorrente de fase com restrição de tensão (51V)
 - Proteção contra falta a terra no estator – 95% (64G1)
 - Proteção contra sobre-excitação (24)
 - Proteção contra sobretensão (59)
 - Proteção contra sub e sobrefrequência (81)
- Relé tipo DLP (fabricação GE)
 - Proteção contra subimpedância – retaguarda (21)
 - Proteção de sobrecorrente – sobrecarga (50)
- Relé tipo SR745 (fabricação GE)
 - Proteção contra sobrecorrente no lado do serviço auxiliar (51)
 - Proteção contra sobrecorrente no lado de 6,6kV (51)
 - Proteção contra sobrecorrente no lado de 138kV (51)
 - Proteção o contra sobrecorrente de sequência negativa no lado de 138kV (46)

Na unidade B, foram considerados em operação os seguintes dispositivos de proteção:

- Relé tipo REG-110 (fabricação ABB)
 - Proteção contra subimpedância – retaguarda (21)
 - Proteção contra sobretensão (59)
 - Proteção contra falta a terra no estator – 95% (64G1) (59G)
 - Proteção contra reversão de potência (32)
 - Proteção contra perda de excitação (40)

- Proteção contra sequência negativa (46)
- Relé tipo REG-150 (fabricação ABB)
- Proteção contra terra no estator
- Relé tipo REG-316 (fabricação ABB)
 - Proteção contra sobre-excitação (24)
 - Proteção contra subimpedância – retaguarda (21)
 - Proteção contra perda de excitação (40)

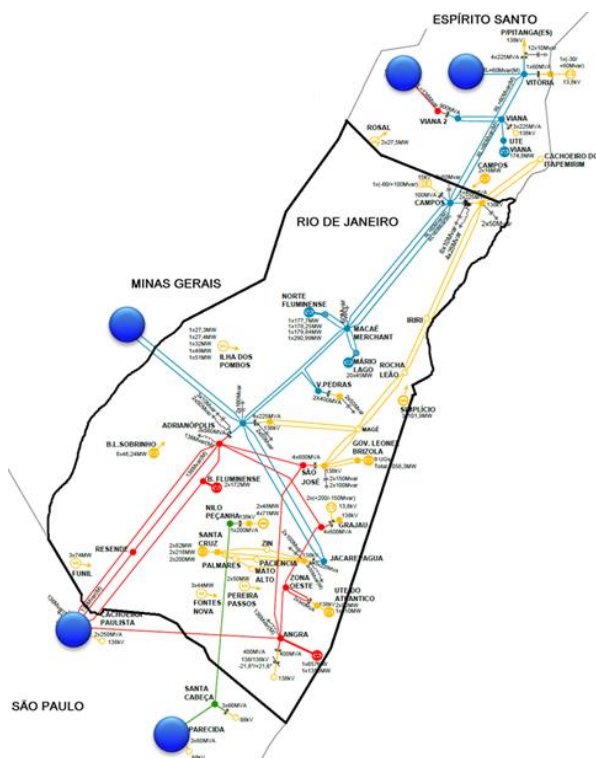


Figura 8. Sistema equivalente utilizado no caso teste

- Proteção contra sequência negativa (46)
- Proteção contra sobretensão (59)
- Proteção contra sobrecorrente (51)
- Relé tipo SPAJ (fabricação ABB 61)
 - Proteção contra sobrecorrente de no Estator (51)
 - Proteção contra sobrecorrente de neutro (51N)

Os modelos dos dispositivos acima citados foram obtidos a partir de documentação fornecida pela Light Energia [10] e extensa consulta a catálogos de fabricantes e a literatura técnica geral [11]. Esses modelos foram, então, codificados de acordo com o descrito na Seção III deste artigo.

C. Exemplo de Testes Realizados

Como ilustração dos testes realizados, é apresentado o caso de um curto-circuito trifásico franco na barra de 138 kV da usina. As figuras a seguir apresentam os resultados relativos à unidade A da usina. A Figura 9 apresenta a tela inicial do processo de simulação, na qual são mostrados os relés em operação na unidade A, as opções de simulação, parâmetros da simulação (duração da simulação e passo de integração) e o tipo de defeito a ser simulado. Além disso, o usuário poderá também optar por quais variáveis serão monitoradas durante a simulação, através da *instalação de medidores*, os quais são indicativos para o software armazenar os resultados dessas

variáveis durante o processo de simulação, para posterior exibição através da interface gráfica. A Figura 10 permite, de forma visual, definir o tipo de defeito a ser simulado, no caso um curto trifásico franco na barra de 138 kV.

A Figura 11 e a Figura 12 representam um dos possíveis tipos de telas de exibição dos resultados da simulação. Na primeira, é apresentada um relatório cronológico dos eventos ocorridos durante a simulação. Paralelamente a essa tela, o usuário poderá acessar outras telas indicando variáveis na rede elétrica ou gráficos da evolução temporal de variáveis medidas. A segunda, apresenta o relatório do status dos relés ao longo da simulação.

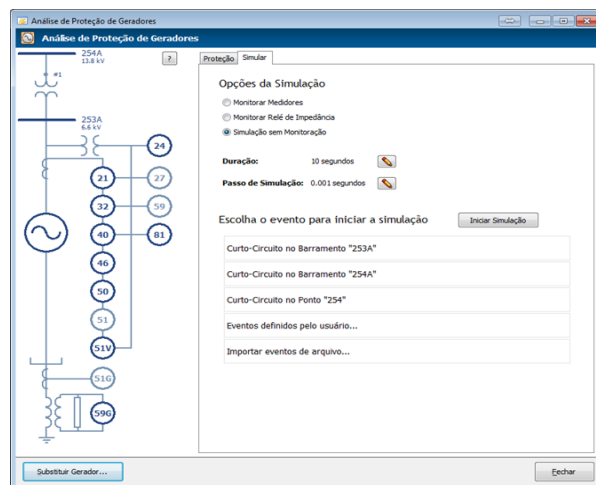


Figura 9. Tela inicial da simulação do defeito na barra 138kV da unidade A de Fontes Nova

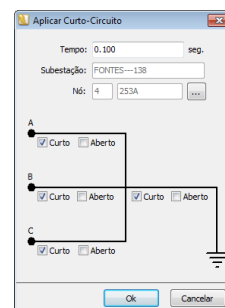


Figura 10. Tela para definição do tipo de defeito

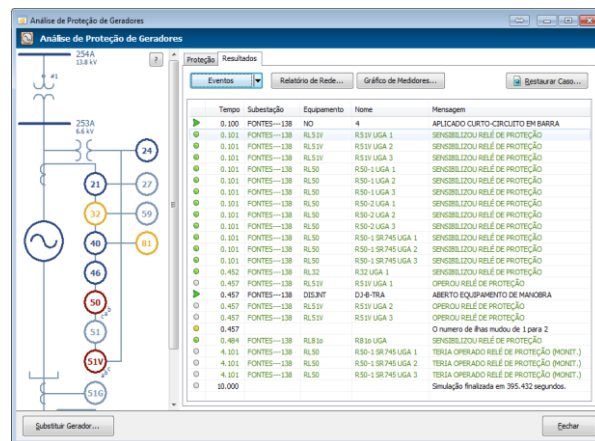


Figura 11. Relatório de eventos resultantes da atuação da proteção

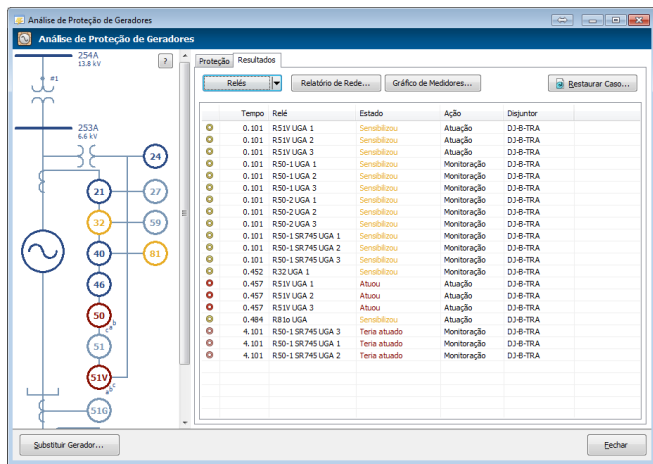


Figura 12. Status dos relés da unidade A ao longo da simulação

Na Figura 13 são mostradas duas telas onde é exibido a evolução temporal da corrente percebida pelo relé 51V (relé de sobrecorrente com restrição de tensão), onde fica evidente a potencialidade da ferramenta desenvolvida para o correto entendimento da atuação da proteção. Esse tipo de visualização de resultados, decorrente da simulação detalhada da evolução temporal das variáveis, permite ao analista claramente entender as interações entre os diversos componentes do sistema elétrico e do sistema de proteção, evidenciando possíveis incorreções no estabelecimento da estratégia de proteção dos geradores.

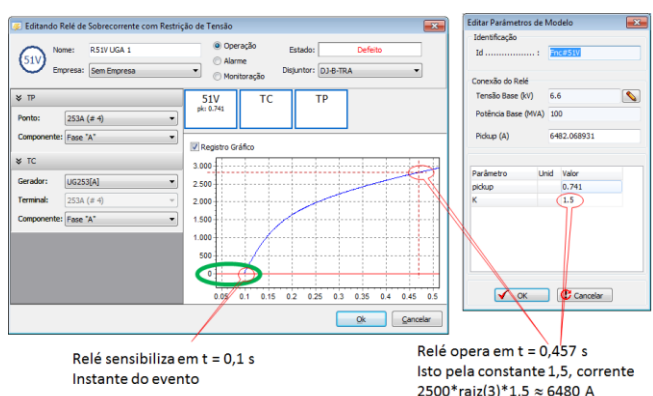


Figura 13. Telas comentadas mostrando o registro gráfico da atuação do relé 51V

VI. CONCLUSÕES

Este artigo apresentou uma metodologia de simulação do desempenho de sistemas de proteção de geradores baseada na modelagem detalhada da dinâmica eletromecânica dos geradores e do sistema elétrico. O trabalho foi motivado pela necessidade de analisar o desempenho de sistemas de proteção de geradores de usinas em diferentes condições de operação e defeitos na rede, para evitar a incorreta atuação dos mesmos e, assim, prevenir interrupções indesejadas no fornecimento de energia elétrica.

O trabalho desenvolvido baseou-se em uma modelagem exata da dinâmica eletromecânica dos geradores e seus controladores, o que permite uma simulação cronológica dos

eventos, levando-se em consideração todos os aspectos dinâmicos que influenciam na atuação da proteção. Essa modelagem dinâmica detalhada viabiliza uma análise fiel da coordenação entre os sistemas de proteção e controle e a curva de capacidade dos geradores síncronos. A metodologia proposta neste artigo, pode ser estendida a outros equipamentos do sistema elétrico como por exemplo, compensadores síncronos e estáticos, elos de corrente contínua, entre outros.

A metodologia desenvolvida permite uma representação trifásica, de sequência positiva ou mista do sistema elétrico, tanto para estudos de regime permanente quanto de simulação da dinâmica eletromecânica.

A metodologia desenvolvida foi testada por meio do estudo do sistema de proteção da usina Fontes Nova da empresa Light Energia, no qual ficou evidente as vantagens da metodologia pesquisada, em relação às anteriormente disponíveis.

VII. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Gopallakrishnan, et al., "A Stepped-Event Technique for Simulating Protection Systems Responses", *Bienal Cigré*, Artigo B5-203, Agosto de 2004.
- [2] H. Bezerra, et al., "Simulador para Treinamento Presencial e a Distância de Proteção e Operação de Sistemas Elétricos", *Anais do XII ERIAC*, Foz de Iguaçu-PR, 20 de maio de 2007.
- [3] H. Song and M. Kezunovic, "Interactive Protection System Simulation Using ATP MODELS and C++", *IEEE PES T&D Conference*, New Orleans, October 2005.
- [4] A.L.P. de Oliveira e P.M. da Silveira, "Simulação Digital em Tempo Real para Análise do Desempenho da Proteção Numérica de Linhas com Compensação Série Fixa", *Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos (SBSE)*, Campina Grande-PB, 17-19 de julho de 2006.
- [5] R. Sandoval, A. Guzman, and H.J. Altuve, "Dynamic Simulations Help Improve Generator Protection", *Proceedings of the IEEE Power Systems Conference: Advanced Metering, Protection, Control, Communication, and Distributed Resources*, pp. 16-38, 2007.
- [6] C.E.V. Pontes, e outros, "Desempenho Dinâmico da Geração Distribuída Frente a Perturbações no SIN e de Manobras na Rede de Distribuição", *V Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica (CITENEL)*, Belém-PA, 22 a 24 de junho de 2009.
- [7] J.M.T. Marinho and G.N. Taranto, "A Hybrid Three-Phase Single-Phase Power Flow Formulation", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 23, No. 3, August 2008.
- [8] A. Manzoni, *Desenvolvimento de um Sistema Computacional Orientado a Objetos para Simulação Rápida e Análise da Estabilidade de Tensão em Sistemas Elétricos de Potência*, Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Março 2005.
- [9] G. N. Taranto, J. M. T. Marinho, D. M. Falcão, T. M. L. Assis, S. L. Escalante, J. I. R. Rodriguez & C. E. V. Pontes, "Simulador de Redes de Distribuição Ativas com Modelagem Monofásica/Trifásica", *Anais do XII Simpósio de Especialistas em Planejamento da Operação e Expansão Elétrica (SEPOPE)*, Rio de Janeiro, Maio 2012.
- [10] *Ajustes de Proteção*, Publicação Interna da Light Energia, sem data.
- [11] D. Reimert, *Protective Relaying for Power Generation Systems*, Taylor and Francis, 2006.