

Modelagem de Relés de Proteção para ATP

Alexandre Menezes de Aguiar
Escola Politécnica – USP
São Paulo, Brasil

Silvio Giuseppe Di Santo
Escola Politécnica – USP
São Paulo, Brasil

Renato Machado Monaro
Escola Politécnica – USP
São Paulo, Brasil

Resumo — A simulação computacional é uma importante ferramenta de projeto e estudo de sistemas de potência. Este trabalho consiste na modelagem de relés digitais de proteção para uso no simulador de transitórios ATP (*Alternative Transients Program*), com o objetivo de serem posteriormente utilizados em ambientes de ensino, pesquisa e desenvolvimento. Para tal, foi utilizado a biblioteca OpenRelay. Foram modelados relés de proteção diferencial, de sobremagnitude e de submagnitude.

Termos de Índices — Simulação de sistemas de potência, ATP, OpenRelay, Relés de proteção.

I. INTRODUÇÃO

Sistemas de proteção são essenciais para manutenção de sistemas elétricos de potência (SEP), pois evitam que condições anormais se mantenham e se propaguem pelo resto do sistema, causando danos a equipamentos e linhas de transmissão, e permitem o reestabelecimento do fornecimento de energia com maior velocidade [1].

Os principais elementos presentes em sistemas de proteção de SEP são: transformadores para instrumentos, relés de proteção e disjuntores [2]. O transformador para instrumentos é utilizado para adequar os sinais lidos da rede ao padrão reconhecido pelos relés de proteção.

O relé de proteção é responsável por determinar se há uma condição anormal de operação em sua zona de proteção, e caso haja, enviar o comando para disjuntores desconectarem fisicamente a zona em questão do resto do sistema elétrico.

A atual dimensão da rede elétrica brasileira reflete na complexidade de seu sistema de proteção, e devido à dificuldade em realizar experiências práticas, ferramentas de simulação são indispensáveis tanto para o estudo quanto para o projeto de SEP [3].

Dentre os programas de simulação de transitórios em SEP, o ATP (*Alternative Transient Program*) é um dos mais reconhecidos [4]. O ATP é a versão não comercial do programa EMTP (*Electromagnetic Transients Program*), e é amplamente utilizado no meio científico. Inicialmente desenvolvido para estudar processos transitórios eletromagnéticos, atualmente permite analisar praticamente qualquer processo transitório, como transitórios de manobra e descargas atmosféricas [5].

O ATP utiliza integração trapezoidal para resolver as equações diferenciais que determinam o comportamento do sistema elétrico no domínio do tempo [6]. Além disso, possui uma linguagem de descrição denominada MODELS que permite a criação de blocos de controle ou componentes elétricos [7].

A linguagem MODELS também permite a utilização de códigos escritos em C/C++ e Fortran. Essa flexibilidade possibilita o uso de bibliotecas desenvolvidas para realizar as funções de um relé de proteção digital, como a OpenRelay.

A OpenRelay, desenvolvida por [8], foi criada para dar suporte ao desenvolvimento de algoritmos de proteção. Desenvolvida em C++, possui todas as funções necessárias para o devido funcionamento de um relé digital, o que permite sua utilização para modelagem de relés de proteção.

Desta forma, este trabalho tem por objetivo a modelagem de relés digitais de proteção para o programa ATP, principalmente em seu ambiente gráfico, ATPDraw [9], utilizando a linguagem MODELS e a linguagem de programação C/C++, a partir das funções dos relés disponíveis na biblioteca OpenRelay.

II. RELÉS DE PROTEÇÃO

Segundo [10], relé é o dispositivo elétrico desenvolvido para responder às entradas (que podem ser de natureza elétrica, mecânica ou térmica) de maneira específica, e após condições determinadas serem atingidas, causar mudança abrupta nos circuitos elétricos associados.

Relés de proteção, sejam estes digitais ou analógicos, são aqueles cuja função é detectar linhas e equipamentos defeituosos ou condições anormais, de natureza perigosa, no sistema de potência, e atuar de forma adequada, como apresentado por [11]-[12]. Além de buscar minimizar os efeitos de faltas elétricas, os relés de proteção também ajudam a determinar o tipo de falta e sua localização.

Para que a aplicação de relés de proteção em sistemas de potência seja feita corretamente, dois tópicos devem ser levados em consideração: parâmetros de projeto de sistemas de proteção e princípios de operação. Enquanto o primeiro trata dos requisitos de um sistema de proteção, o segundo apresenta as possíveis formas que o relé de proteção pode utilizar para detectar a falta na rede.

A. Parâmetros de projeto

Cinco fatores básicos devem ser levados em conta em um sistema de proteção: confiabilidade, seletividade, velocidade de operação, simplicidade e custo [2].

A confiabilidade é a garantia de que a proteção irá atuar corretamente. A confiabilidade possui dois aspectos, segurança e dependabilidade, definidos por [13]. A segurança é a condição de que o sistema de proteção não irá atuar quando não for necessário, enquanto a dependabilidade é a condição de que o sistema de proteção irá atuar quando for necessário.

A seletividade representa a minimização do efeito de uma determinada falta no sistema elétrico. Desta forma, busca-se minimizar a região desconectada do resto do sistema em resposta a falta [14]. Além disso, a seletividade significa que o relé de proteção irá atuar rapidamente para uma falta em sua zona de proteção e atuará com retardo para faltas fora de sua zona de proteção.

A velocidade de operação define a duração de falta devido ao tempo de resposta do sistema de proteção. Simplicidade consiste em utilizar o menor número de equipamentos necessário para realizar a proteção da rede [15]. E custo representa a busca pela maior proteção possível com o menor investimento.

B. Princípio de operação

O princípio de operação dos relés de proteção baseia-se na análise de grandezas elétricas da rede em que está inserido. Desta forma, os princípios de operação podem ser categorizados em função da grandeza observada, como proposto por [16], em nível, comparação de magnitude, fase, diferencial e distância.

O princípio de operação de nível faz a verificação se a amplitude do sinal, seja este referente a tensão ou corrente da rede, está acima ou abaixo de um limite especificado, denominado *pick-up*. Caso o relé opere para valores acima do *pick-up*, este é chamado de relé de sobremagnitude, e caso opere para valores abaixo do *pick-up* de submagnitude [11].

A comparação de magnitude é feita entre dois ou mais circuitos e caso a diferença ultrapasse o *pick-up*, o relé deverá operar. De forma semelhante, o princípio de operação de fase avalia a fase entre a tensão e corrente da rede em um determinado ponto [16].

A proteção diferencial realiza a comparação entre a corrente de dois pontos do mesmo circuito: uma diferença significativa entre as correntes significa a existência de uma falta interna a sua zona de proteção [11].

O princípio de operação da distância utiliza a tensão e corrente medidas em um ponto para calcular a impedância vista pelo terminal do relé, e assim detectar faltas na rede. Adicionalmente, outras grandezas podem ser avaliadas para detecção de anomalias na rede, tais como a frequência, e a amplitude dos harmônicos na rede.

III. OPENRELAY

A biblioteca OpenRelay concentra funções necessárias para o funcionamento de um relé digital. É estruturada em sete classes principais: *Relay*, *Acquisition*, *Measure*, *Logic*, *Protection*, *Display* e *Oscillography*, de onde as outras classes são herdadas.

A OpenRelay permite simular o comportamento de um relé digital a partir de um arquivo com valores de entrada ou realizar o controle em tempo real de um relé digital, com o devido hardware.

A troca de informação entre as classes é realizada pela classe *Channel* que comporta um buffer circular. Cada instância da classe *Channel* pode ser do tipo digital, analógico ou complexo e ser utilizada como entrada, saída ou interno.

A classe *Relay* controla o fluxo de execução do programa: a partir desta classe o usuário define os elementos que deseja implementar no relé. Inicialmente é necessário definir o tipo de aquisição, e em seguida instanciar elementos de outras classes, a depender do tipo do relé e das funções desejadas à serem implementadas.

A classe *Acquisition* é responsável por realizar a leitura dos valores de tensão e corrente necessários para o devido funcionamento do relé digital. A classe *Measure* realiza medidas derivadas, como de valor eficaz e fasor, a partir dos valores obtidos pela *Acquisition*.

A classe *Logic* possui funções lógicas, como AND, OR e NOT que podem ser utilizadas para definir a lógica de acionamento do relé digital. A classe *Protection* possui os algoritmos de proteção responsáveis por definir o acionamento do relé.

A classe *Display* é responsável por imprimir valores selecionados pelo usuário em uma tela ou terminal. A classe *Oscillography* permite salvar os valores obtidos em um arquivo de dados, formando uma oscilografia para um evento. A figura 1 apresenta a organização da OpenRelay.

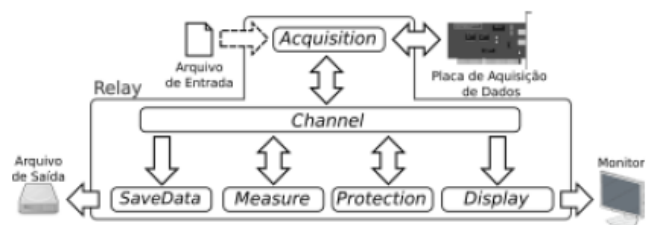


Figura 1. Organização da biblioteca OpenRelay. Fonte: [8].

IV. MODELAGEM DOS RELÉS DE PROTEÇÃO

Os modelos dos relés para ATP, desenvolvidos neste trabalho, são detalhados nos itens A e B a seguir.

A. Integração entre a OpenRelay e o ATP

Como a OpenRelay foi desenvolvida para ler dados advindos de uma placa de aquisição de dados ou de um arquivo de entrada, foi necessário criar classes derivadas das principais para permitir uma comunicação eficaz entre o ATP e a OpenRelay.

Inicialmente foi necessário modificar a classe *Acquisition* para permitir a leitura de dados vindos do ATP, de forma que foi criado a classe herdada *AtpAcquisition* responsável por conectar os dados advindos do ATP com o fluxo de dados da OpenRelay.

Também foi necessário criar classes modificadas devido ao fluxo de execução da OpenRelay: antes de iniciar seu loop de execução a classe *Relay* busca preencher o *buffer* circular de todos os canais construídos, mas recebe do ATP apenas zeros, o que levaria a decisões incorretas até que estes fossem preenchidos novamente com novos dados.

Desta forma, novas classes foram feitas para que a tomada de decisão do relé de proteção ocorra apenas após o preenchimento completo dos buffers circulares, em tempo de simulação, ignorando a etapa de inicialização da OpenRelay e do ATP.

A comunicação entre o ATP e o OpenRelay passa por três camadas. Inicialmente o ATP envia valores de tensão/corrente para o *Model* utilizado na simulação, em seguida este *Model* passa os parâmetros definidos pelo usuário e os valores recebidos pelo ATP para o *Foreign Model* escrito em C++, que por sua vez é responsável por realizar a interface com o OpenRelay. Com o fim da execução do OpenRelay, o valor de saída gerado volta por estas camadas até retornar ao ATP. Este fluxo de execução é apresentado pela figura 2.

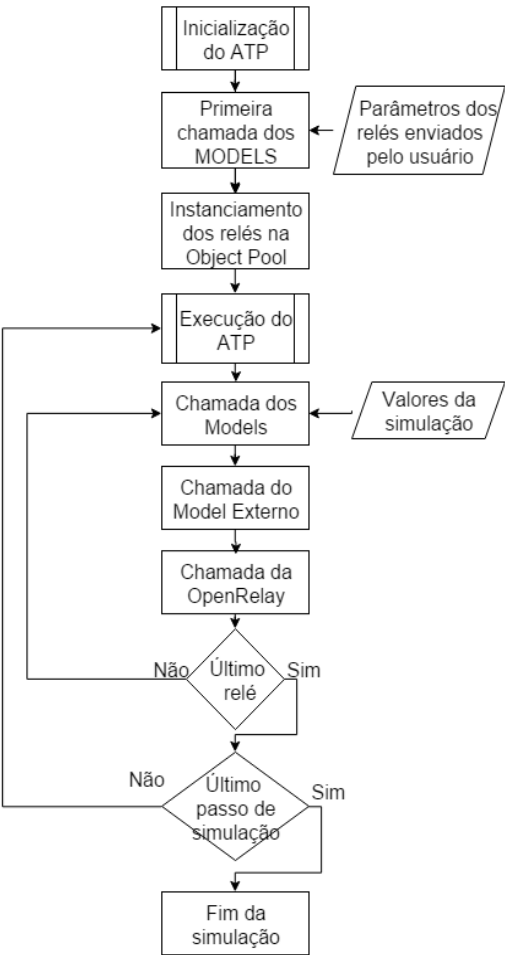


Figura 2. Fluxo de execução dos relés modelados

Antes de iniciar a simulação, o ATP executa uma rotina de inicialização que inclui a execução dos métodos de inicialização de cada *Model* individualmente. Os *Models* recebem os parâmetros de simulação e os dados definidos pelos usuários.

Cada *Model*, por sua vez, executa sua própria rotina de inicialização escrita em C++ (visto que foi utilizado *Foreign Models*): tal rotina é responsável por instanciar o relé de proteção correspondente aos parâmetros definidos pelo usuário, através das funções da OpenRelay, e adicionar tal instância à Object Pool, para evitar sua destruição após fim da rotina.

Durante a execução da simulação, o ATP roda as rotinas de execução de cada *Model*, individualmente, para cada passo de integração. O *Model* recebe valores de tensão ou corrente da rede e as envia para sua rotina de execução em C++.

Tal rotina acessa os objetos criados durante a inicialização e armazenados na Object Pool, preenchendo seu *buffer* circular com os valores de tensão ou corrente e executando o algoritmo de proteção da OpenRelay. A saída do método é o comando enviado ao relé: acionamento ou não do circuit breaker que está conectado.

B. Comunicação entre ATP e Foreign Model

Ao utilizar a *Foreign Model*, o ATP disponibiliza quatro *arrays*: *xdata*, *xin*, *xout* e *xvar*, de tamanho definido pelo usuário e que recebem valores do tipo Double, para comunicação com a *Model*. As três primeiras *arrays*, *xdata*, *xin* e *var*, permitem enviar dados para a *Foreign Model*, e a *array* *xout* permite receber valores de saída da *Foreign Model*.

A tabela 1 apresenta como a comunicação entre o ATP e a OpenRelay foi padronizada. Definiu-se, a partir das necessidades encontradas durante a execução do trabalho, não utilizar a *array* *xvar*, e que a *array* *xdata* teria 10 posições, a *array* *xin* teria 4 posições e *xout* apenas uma posição.

Tabela 1. Padronização da comunicação entre ATP e OpenRelay

Tipo	Posição	Informação
Data	0	Tipo de proteção
Data	1	Valor de Pick-up
Data	2	Reservada para parâmetro de proteção
Data	3	Reservada para parâmetro de proteção
Data	4	Reservada para parâmetro de proteção
Data	5	Reservada para parâmetro de proteção
Data	6	Reservada para parâmetro de proteção
Data	7	Frequência do sistema
Data	8	Harmônico utilizado
Data	9	Passo da simulação
Input	0	Instante na simulação
Input	1	Entrada 01 (Corrente ou Tensão)
Input	2	0/1 para definir número de entradas
Input	3	Entrada 02 (Corrente ou Tensão)
Output	0	Trip do relé

A *Foreign Model* escrita em C++ não é responsável apenas pela comunicação entre um *Model* e o OpenRelay. Na etapa de inicialização da simulação do ATP, a partir dos parâmetros

recebidos de todas as *Models* de relés de proteção, este cria as instâncias das classes da OpenRelay, e mantém suas existências através de uma *Object Pool*, de forma a não perder os dados dos buffers circulares, e manter uma execução fluida do OpenRelay.

C. Modelagem dos relés de proteção

Foram modelados relés de proteção diferencial, de submagnitude e sobremagnitude, para uma fase. Além disso, estes relés foram encapsulados em conjuntos de três para proteção trifásica. Ainda, foi adicionado um intertravamento onde ocorrida a detecção da falta em uma das fases, todas as três são desconectadas.

Os relés de *Overmagnitude/Undermagnitude* admitem duas grandezas elétricas (corrente e tensão) e três tipos de atuação (instantânea, tempo definido e tempo inverso). A atuação instantânea ocorre no exato momento em que o valor de limiar é superado, enquanto a atuação de tempo definido ocorre se a falta se mantém por um período determinado previamente. A atuação de tempo inverso é dada por curvas de comportamento do tipo IEEE, IEC e IAC.

Os relés de *Overmagnitude/Undermagnitude* recebem do usuário até cinco de seis parâmetros, uma vez que não se utiliza todos os parâmetros simultaneamente. Tais parâmetros são: valor de pick-up, tipo de proteção, TDM (multiplicador de tempo), tipo de curva, Dial (tempo de atraso na atuação) e frequência do circuito. A figura 3 apresenta os *models* desenvolvidos para tais proteções, para uma e três fases, visualizados no ATPDraw.



Figura 3. *Models* dos relés de proteção de Magnitude para uma e três fases.

O relé de proteção diferencial de uma fase recebe do usuário oito parâmetros: valor de pick-up, corrente nominal, frequência do circuito, harmônico, break 1, break 2, slope 1 e slope 2. O relé de proteção diferencial trifásico recebe vinte e quatro parâmetros do usuário, oito para cada fase a ser protegida. A figura 4 apresenta o *model* do relé diferencial para uma fase e para três fases.

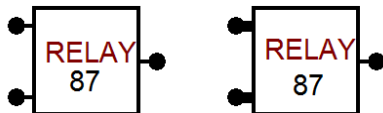


Figura 4. *Models* dos relés de proteção diferencial para uma e três fases.

O usuário pode realizar a entrada dos parâmetros dos *Models* pelo ATPDraw ou durante a criação do arquivo de entrada do ATP manualmente. Clicando na *Model* é aberto uma janela que permite entrar com os valores desejados, como apresentado pela figura 5.

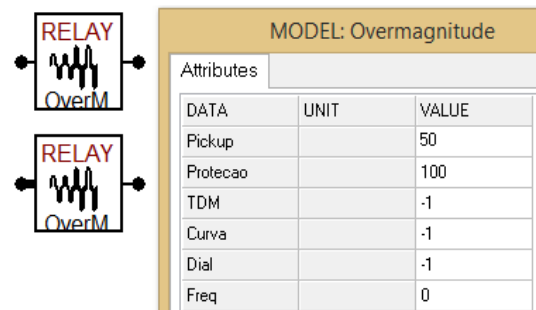


Figura 5. Entrada de parâmetros dos *Models*.

V. RESULTADOS

Para avaliar o desempenho dos relés modelados foi proposto o sistema elétrico apresentado pela figura 6. Foram aplicadas faltas do tipo trifásica nos transformadores e fase-terra e dupla-fase-terra na linha de transmissão. Em seguida, foram feitas simulações para observar o funcionamento de cada relé modelado.

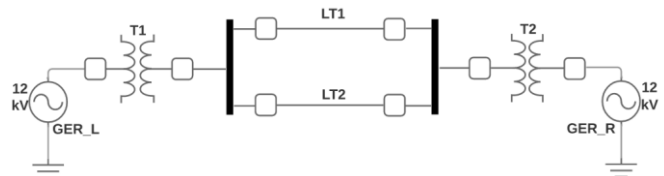


Figura 6. Sistema elétrico proposto.

O tempo máximo de simulação utilizado foi de 0,35s, com um passo de integração igual a 50μs. Os parâmetros da linha de transmissão utilizados podem ser encontrados em [17]. A linha de transmissão possui 40 quilômetros e os transformadores estão conectados em estrela-estrela.

As faltas aplicadas possuem resistência de falta de 5Ω e ângulo de incidência de falta igual a 0°. A falta aplicada em LT1 ocorreu em 15km a partir do transformador T1 e a falta aplicada em LT2 em 0km a partir do transformador T1.

Desta forma, foram realizadas quatro simulações, com uma única falta em cada: duas testando o desempenho do relé de proteção diferencial, uma testando o relé de sobretensão e uma testando o relé de sobrecorrente. Todas as faltas foram aplicadas no instante 0.2s.

Na primeira simulação foi aplicada uma falta fase-terra trifásica dentro da zona de proteção do transformador T1, que é coberta por um relé de proteção diferencial. O resultado da simulação, figura 7, apresenta as correntes no primário e secundário do transformador T1. Observa-se que o relé atuou como esperado, retirando o transformador T1 do resto do sistema elétrico.

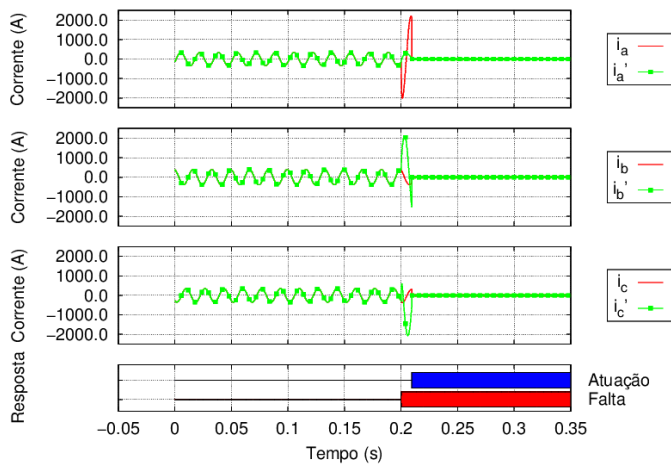


Figura 7. Primeira simulação: proteção diferencial.

O segundo caso de simulação foi feito para observar a atuação do relé de proteção diferencial caso uma falta ocorra fora de sua zona de proteção. A figura 8 apresenta o resultado da segunda simulação. Apesar do óbvio aumento nas correntes do transformador, não há uma diferença significativa entre as correntes do primário e secundário do transformador, de forma que o relé de proteção não atuou, como esperado.

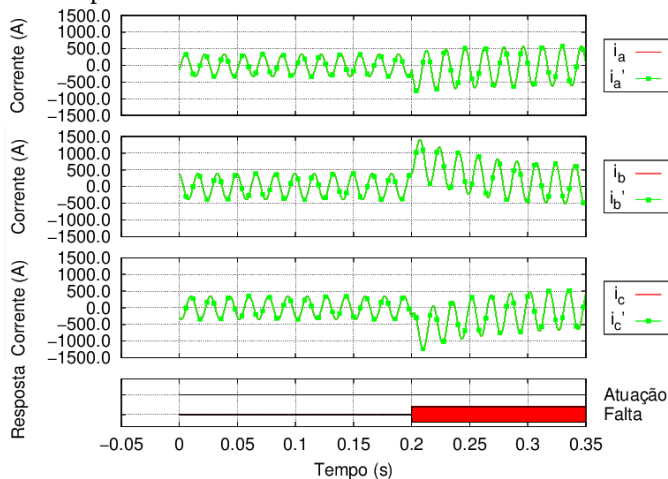


Figura 8. Segunda simulação: proteção diferencial.

No terceiro caso de simulação foi aplicada uma falta fase-terra na fase A da linha de transmissão LT1. O valor de pick-up selecionado foi de 50A. A figura 9 apresenta os sinais de tensão e corrente da linha de transmissão LT1, bem como o valor eficaz da referida corrente. O resultado observado foi o esperado, ou seja, logo após alcançar o valor de pick-up, o relé de proteção de sobrecorrente envia o sinal de trip para os disjuntores, desconectando a linha de transmissão do sistema elétrico.

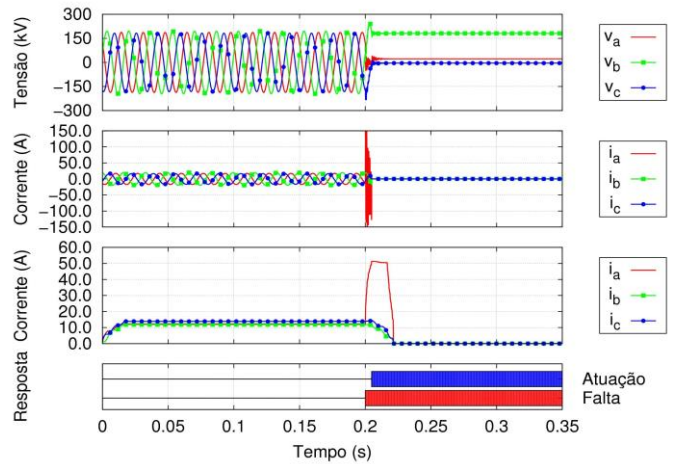


Figura 9. Terceira simulação: proteção de sobrecorrente

Na quarta simulação foi aplicada uma falta dupla-fase-terra envolvendo as fases A e C da linha de transmissão LT2. O valor de pick-up selecionado foi de 180kV. A figura 10 apresenta as tensões, correntes e tensões eficazes na linha de transmissão LT2. A atuação do relé de proteção de sobretensão ocorreu como esperado. A tensão elevada observada na fase B após a falta é explicada pela desconexão da linha de transmissão do resto do sistema elétrico: a linha não possui um meio de se descarregar, mantendo a tensão praticamente constante.

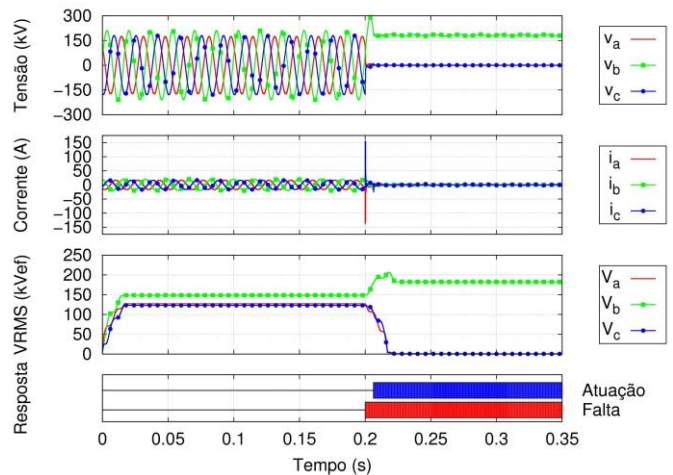


Figura 10. Quarta simulação: proteção de sobretensão

CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou a modelagem de relés digitais de proteção de magnitude e diferencial para o simulador de transientes ATP, a partir da biblioteca OpenRelay. O correto funcionamento dos relés modelados foi verificado a partir das simulações realizadas. Futuras atividades foram propostas, tais como a criação de canais de comunicação entre relés para o estudo da coordenação entre os mesmos e a modelagem de outros relés de proteção, como por exemplo relés de distância.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos à Associação dos Engenheiros Politécnicos da USP (AEP) pela bolsa concedida para o bolsista, e suporte oferecido para suas atividades.

REFERÊNCIAS

- [1] Cotosck,R. Proteção de Sistemas elétricos: uma abordagem técnico-pedagógica. Dissertação de mestrado, UFMG, 2007.
- [2] Elmore,W. Protective relaying theory and applications, 2003.
- [3] Menezes,V. Linhas de transmissão de energia elétrica – aspectos técnicos, orçamentários e construtivos. Monografia, UFRJ, 2015.
- [4] Marinho, J. Simulação de sistemas de energia elétrica com modelagem flexível - monofásica e trifásica. Tese de doutorado, UFRJ, 2008.
- [5] CAUE – Comité argentino de usuarios del EMTP/ATP. Simulación de Componentes Eléctricos con el ATP: Alternative Transients Program..
- [6] Kizilcay, M. Alternative Transients Program Features. 2010. Disponível em: <<http://www.emtp.org/>>.
- [7] Alternative Transients Program (ATP) - Rule Book,Canadian/American EMTP User Group, 1987-1998
- [8] Monaro, R. Lógica Fuzzy Aplicada na Melhoria da Proteção Digital de Geradores Síncronos. 2013. Tese de doutorado, EESC/USP.
- [9] Høidalen, H; Priklxer, L; Hall, J. ATPDraw- Graphical Preprocessor to ATP. Windows version. NTNU,1999.
- [10] Institute of electrical and eletrronics enginners. C37-90: IEEE Standard for Relays and Relay Systems Associated with Electric Power Apparatus. [S.I],2005.
- [11] Blackburn, J.Lewis. Domin, Thomas J. Protective Relaying: Principle and applications. Terceira edição, 2007. ISBN: 1-57444-716-5.2
- [12] Mason, C. The art & science of protective relaying. 1956. Disponível em: <<http://www.gedigitalenergy.com/>>.
- [13] Institute of electrical and eletrronics enginners. C37-100: IEEE Standard Definitions for Power Switchgear. [S.I],1992.
- [14] Fox,G. Power system Selectivity: The basics of protective coodination. GE ESL Magazine, Issue IV. 2006.
- [15] Hunt, Lloyd F. Simplicity in protective relaying. Southern California Edison-Company, Ltd., Los Angeles, Calif.
- [16] Horowitz,H; Phadke,G. Power system relaying. Terceira edição, 2008. ISBN: 978-0-470-05712-4
- [17] Di Santo, S. De Moraes Pereira, Carlos. Fault location method applied to transmission lines of general configuration. International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 2015.