

## Desenvolvimento de Modelo Virtual de Religador para Redes de Distribuição de Energia para uso em Simulação Hardware-in-the-Loop <sup>\*</sup>

Isabella B. Pereira <sup>\*</sup> Adriano P. De Moraes <sup>\*\*</sup>  
Fernando G. K. Guarda <sup>\*\*</sup> Jhonatan A. Cassol <sup>\*</sup>

<sup>\*</sup> Universidade Federal de Santa Maria, RS, Brasil, CEESP-LAPES  
(isabella.basso@acad.ufsm.br) (jhonatancassol@gmail.com)

<sup>\*\*</sup> Colégio Técnico Industrial de Santa Maria, RS, Brasil  
(adriano@ctism.ufsm.br) (fernando.guarda@ufsm.br)

---

**Abstract:** This paper aim to model a distribution recloser in order to use it in real time digital simulations studies. The importance of automatic reclosers is pointed out due to its ability to clear temporary faults and ensure selectivity for permanent faults. To run the real time simulation, the hardware-in-the-loop methodology is used, which is designed using Typhoon HIL Inc. software and hardware tools. The model is developed based on the performance of real reclosers, involving all its operation settings. To validate the proposed model, it is inserted in a test system, having its behavior evaluated when submitted to several types of faults. The model has correctly operated for all faults, either temporary or permanent. Also, the recloser operating times are within the limits set by distribution systems protection standards.

**Resumo:** Este trabalho tem como objetivo modelar um religador de distribuição para aplicação em estudos envolvendo simulação digital em tempo real. É salientada a importância de religadores automáticos em sistemas de proteção devido a sua capacidade de eliminar faltas temporárias e garantir seletividade para faltas permanentes. Para executar a simulação em tempo real é utilizada a metodologia *hardware-in-the-loop*, implementada a partir das ferramentas de *software* e *hardware* da *Typhoon HIL Inc.* O modelo é desenvolvido com base no funcionamento de religadores reais, envolvendo todos os ajustes de operação dos mesmos. Para validar a modelagem, o bloco do religador é inserido em um sistema-teste, no qual é verificado o comportamento do modelo virtual ao ser sensibilizado por diferentes tipos de faltas. O modelo atuou corretamente para todas as faltas, sejam elas temporárias ou permanentes. Também, os tempos de operação do religador permaneceram dentro dos limites estabelecidos pelas normas de proteção de sistemas de distribuição.

**Keywords:** automatic reclosers; modeling; digital real-time simulation; hardware-in-the-loop; distribution systems; protection.

**Palavras-chaves:** religadores automáticos; modelagem; simulação digital em tempo real; *hardware-in-the-loop*; sistemas de distribuição; proteção.

---

### 1. INTRODUÇÃO

O sistema de distribuição de energia elétrica é o segmento do sistema elétrico de potência responsável por receber a energia dos circuitos de transmissão e entregá-la às unidades consumidoras.

Algumas particularidades do sistema de distribuição, tais como a proximidade aos aglomerados urbanos, presença de alimentadores de grande extensão e de construção aérea, trazem à tona a vulnerabilidade desse sistema em relação a ocorrência de faltas e em consequência a interrupções de energia (Junior and Ferreira, 2009).

Uma falta é uma condição física que impossibilita o correto funcionamento de um determinado dispositivo. As faltas

são classificadas de acordo com sua natureza em permanentes e temporárias (Short, 2004).

As faltas permanentes causam interrupções sustentadas para todos consumidores do trecho em falta, e portanto requerem o deslocamento de uma equipe de manutenção até o local da falta para correção do problema. Já as faltas temporárias podem se extinguir mesmo sem a atuação do sistema de proteção ou são eliminadas pelo simples desligamento momentâneo do sistema, necessário para extinguir o arco elétrico (Gonen, 2014).

Gonen (2014) estima que 75% a 90% das faltas são temporárias. Dessa forma, é preciso que o sistema de proteção saiba identificar faltas dessa natureza para eliminá-las sem que ocorra uma interrupção de longa duração.

Os dispositivos de proteção contra de sobrecorrente usualmente utilizados em sistemas de distribuição são: chave

---

<sup>\*</sup> Trabalho apoiado pelo programa PROBIC-FAPERGS.

fusível, seccionizador, conjunto disjuntor/relé e religador (Gonen, 2014).

Dentre estes equipamentos, as chaves fusíveis do tipo expulsão são as de uso mais comum, tendo em vista seu baixo custo e simplicidade. A atuação destes dispositivos é dada pela fusão de um elemento fusível (elo), que é aquecido em virtude da passagem de uma sobrecorrente através do mesmo, devido a uma condição de curto-circuito ou sobrecarga (Short, 2004) (Gonen, 2014).

Quando a chave fusível interrompe uma sobrecorrente, seja para remover uma falta na linha ou em um equipamento específico, o elo é destruído. Dessa maneira, para restabelecer o trecho em falta é inevitável o deslocamento de uma equipe de manutenção para reposição do elo fusível. Isto significa que ocorre uma interrupção de longa duração, mesmo se tratando de uma falta temporária.

Dado que a grande maioria das faltas são temporárias, foi desenvolvido um dispositivo de proteção capaz de distinguir faltas temporárias e permanentes. O religador automático atua desconectando e reconectando o circuito quando identifica uma falta. Sendo assim, o religador é capaz de restabelecer o sistema ao eliminar uma falta temporária ou isolar uma falta permanente, garantindo seletividade.

Tendo em vista a importância deste equipamento para a proteção de sistemas de distribuição, este trabalho apresenta a modelagem virtual de um religador automático para uso em estudos de proteção envolvendo simulação digital em tempo real. Para tanto, foram utilizadas as ferramentas de *software* e *hardware* da *Typhoon HIL Inc.*

Com o uso da metodologia *hardware-in-the-loop* para execução de simulações digitais em tempo real é possível realizar testes em dispositivos de forma mais detalhada do que em simulações *offline*, tornando viáveis testes em esquemas de proteção complexos.

## 2. RELIGADORES AUTOMÁTICOS

O religador automático é um dispositivo que tem capacidade de interromper o fluxo de corrente ao detectar uma sobrecorrente e automaticamente religar um circuito de corrente alternada. O dispositivo segue uma sequência pré-determinada de abertura e religamento de seus contatos, sucedida pelo bloqueio (manter os contatos abertos) caso a falta não seja eliminada, caso contrário os contatos são mantidos fechados ou se necessário ocorre o rearme (Short, 2004).

Um religador possui duas características tempo x corrente de operação, a rápida e a lenta ou temporizada. A diferença entre elas é o tempo necessário para interromper o circuito. Basicamente, a operação rápida garante o restabelecimento automático para faltas temporárias e a operação lenta assegura que o dispositivo mais próximo a falta atue antes que o religador para faltas permanentes, de forma a reduzir o trecho em falta.

Geralmente os religadores podem ser ajustados a partir das seguintes sequências de operações: 2 rápidas e 2 lentas, 1 rápida e 3 lentas, 3 rápidas e 1 lenta, 4 rápidas ou ainda 4 lentas. Nota-se que todas as sequências são compostas por 4 operações, isto significa que o religador realiza 3

religamentos e 4 disparos, sendo que o último disparo é correspondente ao bloqueio do dispositivo. Na Figura 1 é apresentado um exemplo de sequência de operação completa de um religador, constituída por 2 operações rápidas e 2 lentas.

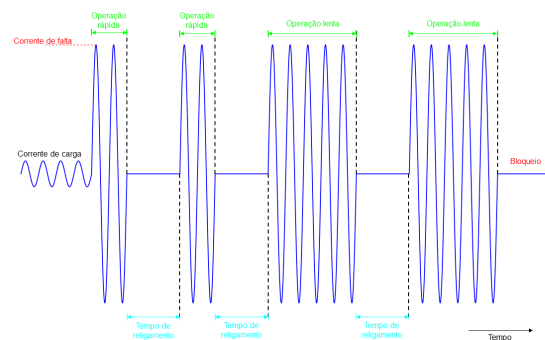


Figura 1. Exemplo de sequência de operação completa

Para ajustar um religador é preciso determinar algumas especificações, de forma a cumprir os critérios de projeto. Tais especificações são: ajuste da corrente de disparo para proteção de fase e de neutro, das curvas características tempo corrente, da sequência de operações pretendida e dos tempos de religamento e de rearme (Filho and Mamede, 2020).

## 3. SIMULAÇÕES DIGITAIS EM TEMPO REAL

Para executar uma simulação em tempo real é necessário que o simulador digital empregado tenha capacidade de resolver as equações do modelo para um passo de tempo de simulação dentro do próprio tempo descrito em um relógio no mundo real (Omar Faruque et al., 2015).

Na prática, se define um passo de tempo adequado para simulação. Se o tempo de execução for menor ou igual a este passo de tempo, se trata de uma simulação em tempo real, caso contrário a simulação é classificada como *offline*. Nesta situação deve-se verificar a possibilidade de aumentar o passo de tempo ou simplificar o modelo desenvolvido, a fim de executar a simulação em tempo real (Omar Faruque et al., 2015).

As simulações digitais em tempo real utilizadas para estudos de sistemas de potência podem ser classificadas como: totalmente digital ou *hardware-in-the-loop*. Dentre as completamente digitais, destaca-se a metodologia *software-in-the-loop* (SIL). SIL é uma simulação executada somente em software, de dois ou mais subsistemas modelados no mesmo simulador digital. Por ser totalmente digital, neste tipo de simulação não há conexão de dispositivos externos (Omar Faruque et al., 2015) (Lundstrom et al., 2016).

Dessa maneira, simulações SIL normalmente são utilizadas em estudos preliminares, tais como, prova de conceito e correção de *bugs* no código do algoritmo quando executados em tempo real.

Em uma simulação *hardware-in-the-loop* (HIL), uma parte do sistema é modelada e simulada em tempo real e o restante é de fato o *hardware*, conectado na malha de simulação. Desse modo, tem-se um fluxo bidirecional de

informações entre os modelos analíticos e os componentes reais (Omar Faruque and Dinavahi, 2010).

Destaca-se que uma simulação HIL se comunica com sistemas físicos, de modo que é necessário operar em tempo real. Isto significa que o fato da simulação rodar em tempo real é um requisito deste tipo de teste.

Ao incluir unidades de *hardware* em uma simulação em tempo real é possível melhorar a fidelidade dos resultados da simulação. Isto é bastante proveitoso quando se tem partes do sistema que são de difícil modelagem. Simulações HIL também podem ser utilizadas para avaliar o comportamento de dispositivos reais sob condições adversas relevantes que dificilmente ocorrem na prática, ou ainda, quando é impraticável a construção do sistema físico por completo em laboratório (Sparn et al., 2018).

A principal vantagem dos testes HIL é a sua operação em malha fechada, conforme ilustrado na Figura 2. O sistema elétrico é modelado no simulador e roda no *hardware*, que transforma os sinais computacionais em variáveis de tensão e/ou corrente permitindo a conexão de um dispositivo externo para ser testado, o DUT (*Device Under Test*).

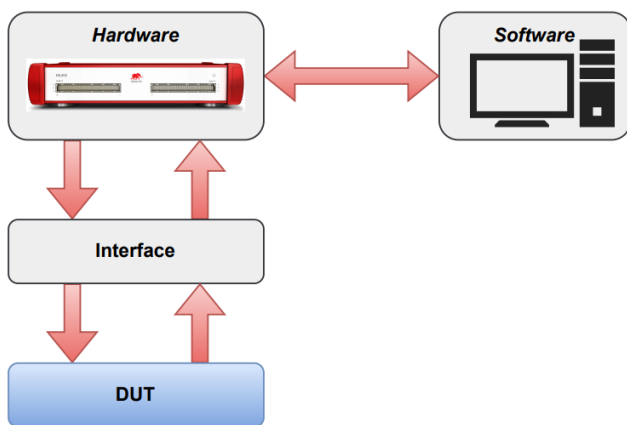


Figura 2. Fluxo de informações em uma simulação HIL

Para possibilitar a interação entre o *hardware* de simulação e o DUT, normalmente é preciso incluir uma interface. Quando o DUT é um dispositivo de proteção, a interface garante que o equipamento seja sensibilizado por sinais reais de tensão e/ou corrente, uma vez que os sinais analógicos na saída do simulador são de baixa magnitude (Omar Faruque et al., 2015).

Neste trabalho, é utilizado o *hardware* HIL402 (Typhoon, 2021a) para efetuar a simulação, já a modelagem é realizada a partir das ferramentas do *software* Typhoon HIL Control Center (Typhoon, 2021c). Se utiliza da plataforma *Schematic Editor* para desenvolver o modelo a ser simulado e do *HIL SCADA* para elaborar uma interface que permita a interação do modelo com a simulação em tempo real, tanto para promover ações como para verificar respostas.

Pelo *HIL SCADA* é possível visualizar e controlar as variáveis de interesse, tornando viável a reconfiguração da simulação, e por consequência permitindo que o usuário realize diversas análises durante a mesma simulação, ou seja, sem alterar o modelo no *Schematic Editor*.

#### 4. SISTEMA-TESTE

Para validar o correto funcionamento do modelo desenvolvido é utilizado um sistema-teste, composto por uma fonte de tensão trifásica, impedâncias da linha, carga, um bloco que emula diversos tipos de faltas e o bloco do religador, como apresentado na Figura 3.

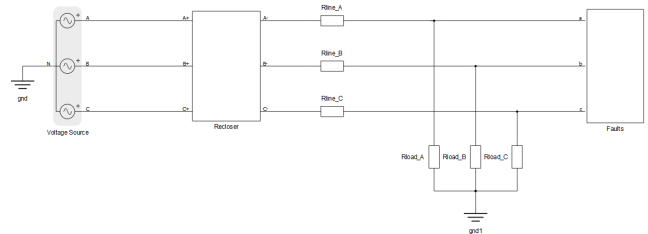


Figura 3. Sistema-teste

A proposta deste trabalho é a modelagem virtual de um religador genérico para viabilizar estudos de proteção de redes de distribuição em tempo real. Como há necessidade de validar o modelo, todo sistema-teste está rodando no HIL402, inclusive o bloco do religador.

Caso não haja disponibilidade de *hardware* para simulação *hardware-in-the-loop*, a Typhoon HIL Inc oferece a a simulação a partir do *Virtual HIL* (VHIL) (Typhoon, 2021b). O VHIL é um componente do *software* que emula o *hardware* da Typhoon HIL Inc. Portanto, a simulação não ocorrerá em tempo real, visto que o passo de simulação irá depender da capacidade de processamento do computador utilizado. Ainda, como o VHIL é fundamentado em *software*, não existe a possibilidade de conexão de dispositivos externos.

#### 5. MODELO VIRTUAL DO RELIGADOR

O modelo virtual do religador é elaborado na plataforma *Schematic Editor*. Na Figura 3 é apresentada a máscara do religador, e dentro deste bloco são definidas as características para reproduzir o comportamento de um religador real.

Para facilitar a modelagem, as diversas funções de um religador foram divididas nos seguintes elementos:

##### 5.1 Variáveis de entrada

Todos os ajustes referentes ao religador são tratados como entrada do seu bloco, para que o usuário defina esses ajustes e satisfaça os critérios de proteção.

Poucos ajustes do religador são definidos no esquemático. A maioria é disponibilizada no *SCADA*, sendo possível sua alteração durante a simulação para realizar diferentes análises.

##### 5.2 Medição de Corrente e Cálculo RMS

Na Figura 4 é apresentado o circuito de potência do religador, onde é feita a medição de corrente nas fases e são adicionadas chaves ideais. Estas chaves representam os contatos do religador e operam de forma simultânea de acordo com o controle. Ainda, se tem a informação

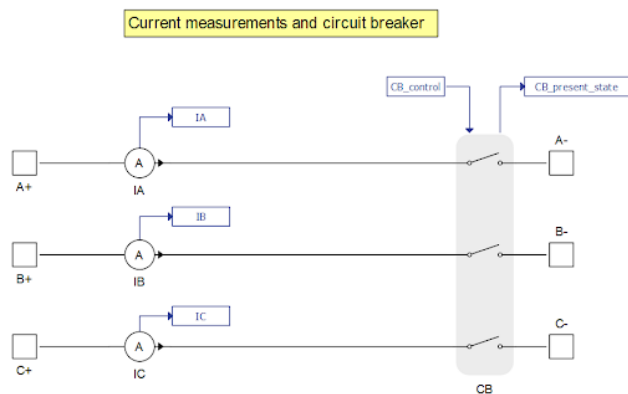


Figura 4. Circuito de potência do relógio modelado

do estado atual das chaves, variável de interesse para o controle.

Para obtenção da corrente de neutro, são somadas as correntes em cada fase. O valor RMS (*Root Mean Square*) é calculado a partir de um bloco disponível na biblioteca do *Schematic Editor*. Na Figura 5 são apresentados os blocos com a respectiva lógica matemática.

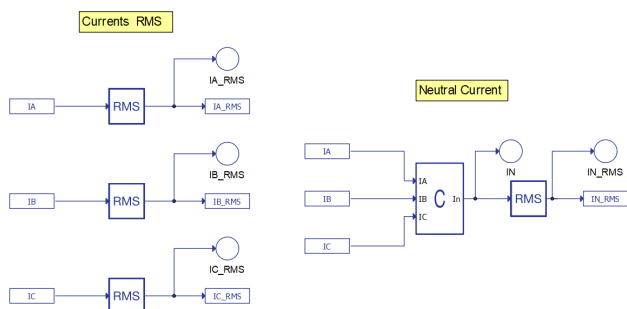


Figura 5. Cálculo da corrente de neutro e dos valores RMS

### 5.3 Proteção de Fase e de Neutro

Para verificar a condição de falta, são implementados blocos de proteção de fase e de neutro. Estes blocos tem sua lógica baseada no funcionamento das unidades temporizadas de um relé de sobrecorrente (funções ANSI 51/51N).

Diversos tipos de relés são utilizados em sistemas de distribuição para monitorar fenômenos e assim, controlar os disjuntores associados. O relé de sobrecorrente temporizado analisa a corrente do circuito, se o valor estiver acima do ajuste definido é enviado um sinal para abertura do disjuntor de forma temporizada. Estes relés são denominados relés de tempo inverso, devido a sua característica tempo corrente, onde o relé irá operar mais rapidamente com o crescimento da corrente (Short, 2004).

Os blocos de proteção desenvolvidos são compostos por dois blocos: um para proteção rápida e outro para a proteção temporizada. Na saída destes blocos se tem a variável de *trip*. Ainda é realizada a unificação dos sinais de *trip* rápido e lento para facilitar o desenvolvimento da unidade de controle. Como exemplo, na Figura 6 são apresentadas as lógicas incluídas no bloco de proteção de

fase, destacando que a mesma estrutura é utilizada para proteção de neutro.

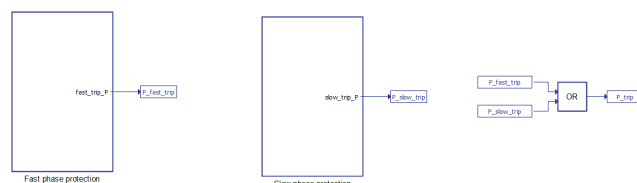


Figura 6. Bloco de proteção de fase

A partir da divisão da proteção para cada tipo de operação é possível implementar a sequência de operações definida pelo usuário, tendo em vista que estes blocos são habilitados pelo controle. Ou seja, ao selecionar a sequência de operações, a unidade de controle já identifica quando é necessário verificar o sinal de *trip* rápido ou lento. Tem-se uma espécie de intertravamento, impedindo que ambas operações sejam habilitadas simultaneamente.

O tempo de operação das proteções, dada a magnitude da corrente de falta, é calculado a partir da equação (1). As variáveis  $A$ ,  $B$  e  $P$  são parâmetros da curva tempo corrente selecionada. Por isso, nos blocos de proteção são inicializados os coeficientes de todas curvas disponíveis.

$$t_{op} = TD \cdot \left( B + \frac{A}{M^P - 1} \right), \quad (1)$$

Onde:  $t_{op}$  é o tempo de operação em segundos,  $TD$  é o *dial* de tempo e  $M$  é o múltiplo da corrente de ajuste.

Este modelo possui 5 tipos de curvas características tempo e corrente do padrão dos EUA e outras 5 do padrão IEC, conforme apresentado na Tabela 1. Os parâmetros do padrão EUA são estabelecidos na IEEE C37.112-1996, e os das curvas IEC são definidos pela IEC 60255.

Tabela 1. Tipos de curvas.

U.S.	IEC
U1 - Moderatly Inverse	C1 - Standard Inverse
U2 - Inverse	C2 - Very Inverse
U3 - Very Inverse	C3 - Extremely Inverse
U4 - Extremely Inverse	C4 - Long-Time Inverse
U5 - Short-Time Inverse	C5 - Short-Time Inverse

Os blocos de proteção das unidades de fase e neutro são desenvolvidos em linguagem C. O funcionamento é descrito no fluxograma apresentado na Figura 7. As proteções rápida e lenta de neutro diferem das de fase pois é analisada apenas uma corrente do circuito, a corrente que passa pelo neutro. Enquanto as proteções de fase analisam 3 correntes, ou seja, se tem 3 múltiplos da corrente de ajuste. Caso a corrente medida em qualquer uma das fases for maior que o ajuste, a proteção associada irá operar.

### 5.4 Unidade de Controle

O bloco de controle do relógio é desenvolvido em linguagem C, onde seu objetivo é realizar as operações de abertura e fechamento dos contatos. Dessa forma, é implementada uma sequência de operações tal qual a apresentada na Figura 1, respeitando os ajustes definidos e operando adequadamente conforme as características da simulação.

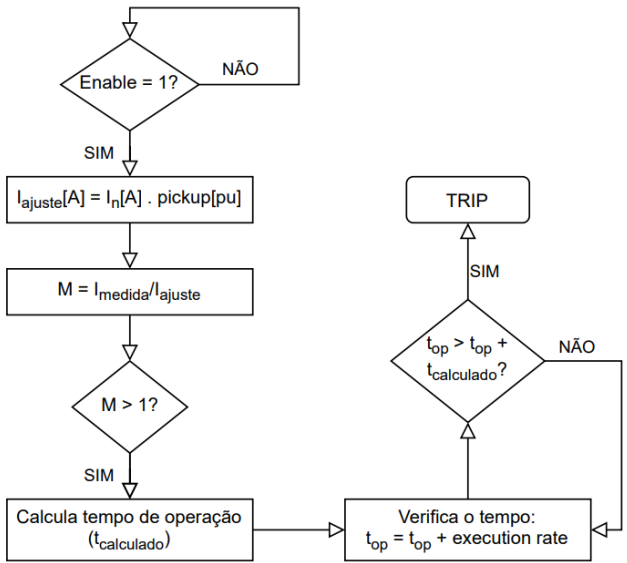


Figura 7. Fluxograma dos blocos de proteção rápida e lenta

Para efetuar o controle, o estado atual dos contatos do religador é verificado constantemente, na intenção de observar se o circuito está aberto ou fechado. Nas Figuras 8 e 9 são apresentados fluxogramas simplificados que descrevem o funcionamento do controle para cada condição.

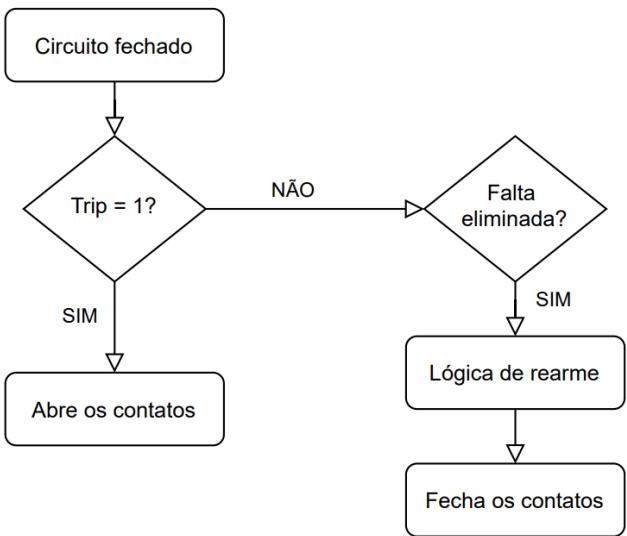


Figura 8. Fluxograma simplificado do controle - parte 1

As lógicas de rearme e religamento são relativas à verificação do tempo, e são completadas quando a contagem de tempo atinge o respectivo tempo definido pelo usuário. O rearme do dispositivo pode ocorrer desde a segunda operação, ou seja, após acontecer o primeiro *trip* e o primeiro religamento.

O usuário também consegue realizar o rearme manual a qualquer momento. Inclusive, a única forma de sair do modo de bloqueio é eliminando a falta para efetuar o rearme, e assim fechar os contatos do religador novamente.

A unidade de controle que identifica a sequência de operações selecionada e envia para cada bloco de proteção em que momentos os mesmos deverão ser habilitados. Ainda,

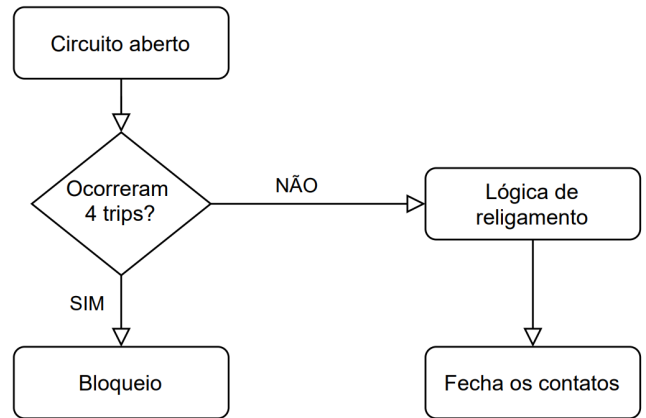


Figura 9. Fluxograma simplificado do controle - parte 2

é preciso que o controle diferencie se a proteção de fase ou a de neutro atuou, para o caso de ambas proteções estarem habilitadas. Para tanto, é observado no primeiro *trip* qual proteção atuou primeiro, de forma a manter somente ela habilitada até o final da sequência de operações em progresso.

## 6. RESULTADOS

Antes de verificar os resultados da simulação *hardware-in-the-loop* é interessante compreender o painel desenvolvido no HIL SCADA. Para este sistema-teste tem-se a determinação das configurações do religador e da rede, que podem ser vistas nas Figuras 10 e 11.



Figura 10. Painel SCADA - Rede



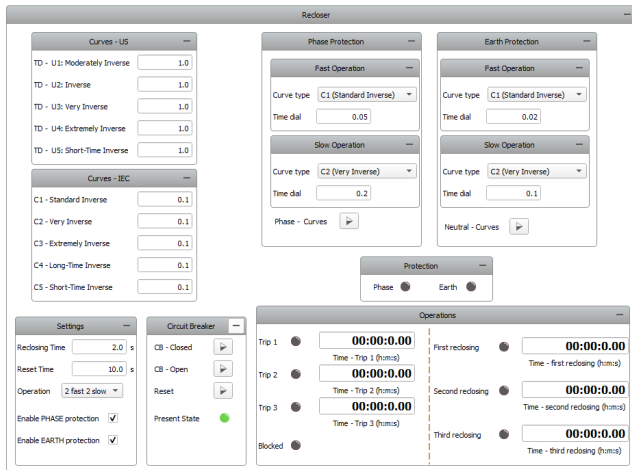


Figura 11. Painel SCADA - Religador

Na janela referente a rede, pode ser ajustado o nível de tensão da fonte trifásica, são exibidos gráficos das correntes RMS, e ainda é possível efetuar uma falta ou eliminá-la a qualquer momento.

Na janela do religador, o usuário consegue observar as curvas tempo corrente para diferentes dias de tempo, de modo a realizar o ajuste da forma mais adequada possível. Também são determinadas a grande maioria dos parâmetros do religador. Ainda, é exibido o instante em que ocorreu o *trip* e o momento final do tempo de religamento de cada operação, bem como é apresentado se a atuação é relativa a proteção de fase ou de neutro.

Para promover uma simulação satisfatória, os ajustes do religador exibidos na Tabela 2 foram considerados. Estes parâmetros foram definidos a partir da análise das características do sistema-teste.

Tabela 2. Parâmetros do religador.

Corrente nominal	55 A	
Seqüência de operações	2 rápidas e 2 lentas	
Tempo de religamento	2s	
Tempo de rearme	10s	
Ajuste de fase	Rápida	Lenta
Curva - fase	1,5	2,5
Dial - fase	IEC - C1	IEC - C2
Ajuste de neutro	0,2	1,0
Curva - neutro	IEC - C1	IEC - C2
Dial - neutro	0,02	0,1

Além disso, foi definido um passo de tempo de simulação de  $100\mu s$  para o qual o simulador foi capaz de garantir o determinismo temporal, ou seja, as simulações realizadas são realmente executadas em tempo real.

Com o intuito de verificar o correto funcionamento do modelo desenvolvido são analisadas duas situações: atuação do religador para uma falta bifásica e para uma falta monofásica com impedância de defeito de  $30\Omega$ . Destaca-se que em ambas análises a proteção de fase e de neutro do dispositivo estão ativadas. Ainda, nestes estudos é observada a seqüência de operações completa do religador, até o bloqueio do mesmo.

### 6.1 Falta bifásica

Na Figura 12 é exibido o gráfico da corrente RMS na fase A ao realizar um curto-circuito bifásico entre as fases A e B. O sistema estava operando com corrente nominal até o ponto onde ocorre a falta, o religador verifica a sobrecorrente e abre seus contatos, os fechando novamente passado o tempo de religamento, repetindo essa seqüência até o bloqueio de seus contatos. Nota-se que o religador efetuou duas operações rápidas e duas lentas, como esperado. Neste gráfico também são exibidas as correntes de ajuste de fase para as operações rápidas e lentas.

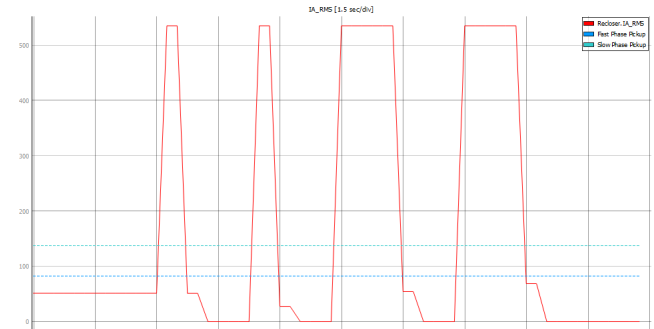


Figura 12. Corrente RMS na fase A

Na Figura 13 verifica-se que a proteção de fase foi responsável pela atuação do dispositivo, como desejado, uma vez que a corrente de falta não flui pelo neutro do sistema. Além disso, são apresentados os tempos relativos às operações da Figura 12, ressalta-se a confirmação do tempo de religamento definido e do tempo de atuação para cada operação.

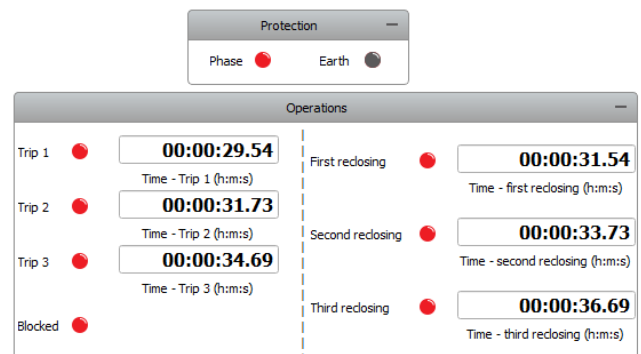


Figura 13. Proteção de fase e tempos de atuação

### 6.2 Falta monofásica

Ao efetuar uma falta monofásica envolvendo a fase A e a terra é visualizado o gráfico da Figura 14, que se refere a corrente RMS que flui pelo neutro do sistema. Inicialmente, a corrente de neutro é nula, dado que o sistema-teste é simétrico. A partir do momento em que ocorre a falta, o religador executa duas operações rápidas seguidas de duas lentas. Neste gráfico também são apresentadas as correntes de ajuste de neutro definidas pelo usuário.

Na Figura 15 são exibidos os tempos de operação, onde é confirmado o tempo de religamento. Ainda, nota-se que

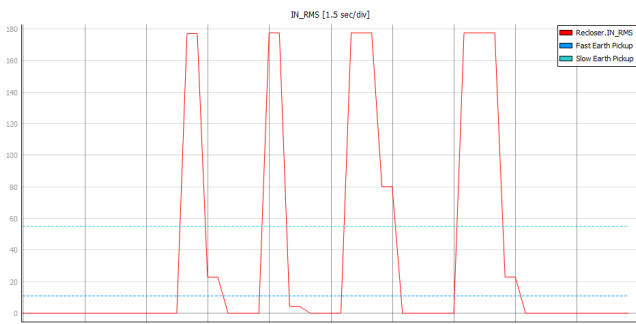


Figura 14. Corrente RMS fluindo no neutro do sistema a atuação do religador foi dada pela proteção de neutro, visto que a unidade de neutro é mais sensível que a de fase.

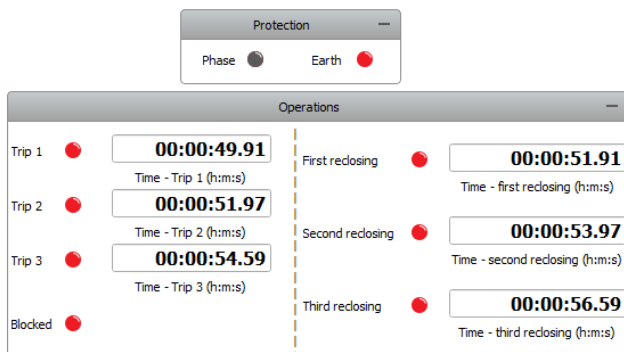


Figura 15. Proteção de neutro e tempos de atuação

Em ambas análises, pode-se dizer que foram efetuadas faltas permanentes, visto que o religador completou uma sequência completa de operações. Após o bloqueio é necessário eliminar a falta e realizar o rearme manual do dispositivo para conseguir fechar os contatos novamente.

No caso de ocorrência de faltas temporárias, a falta pode ser eliminada durante o tempo de religamento, enquanto os contatos estão abertos, ou durante o trip, enquanto os contatos estão fechados. Se os contatos estão fechados e a falta é eliminada, o sistema volta a operar com corrente nominal instantaneamente. Já quando os contatos estão abertos, o sistema passa a operar com corrente nominal no momento em que o tempo de religamento é finalizado.

Ainda, dada a eliminação da falta temporária, é aguardado o tempo de rearme e então as operações são zeradas, de forma que o religador fica pronto para atuar novamente.

## 7. CONCLUSÃO

Neste trabalho foi salientada a importância de religadores automáticos em sistemas de proteção de distribuição, e o benefício da sua modelagem em estudos envolvendo simulações em tempo real. Desse modo, foi realizado o projeto do modelo virtual de um religador genérico baseado no funcionamento de religadores reais. A fim de verificar o funcionamento do modelo desenvolvido, foi criado um sistema-teste e foram definidos os ajustes do religador de acordo com o mesmo.

Para executar a simulação *hardware-in-the-loop* foi utilizado *hardware* HIL402. Ao realizar análises a partir da simulação em tempo real do sistema-teste foram obtidos

resultados que confirmam a correta modelagem do dispositivo.

Portanto, será possível integrar o modelo virtual desenvolvido em sistemas mais complexos, para realizar estudos de proteção. Além disso, em razão do uso da metodologia *hardware-in-the-loop*, existe a possibilidade de implementar um sistema de distribuição qualquer em *software* e conectar o controle do religador físico no *hardware* utilizado, submetendo o dispositivo para teste em variadas situações.

## AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES/PROEX) - Código de Financiamento 001.

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul (FAPERGS) pelo aporte financeiro no desenvolvimento desta pesquisa. Os autores também agradecem o apoio técnico da *Typhoon HIL Inc.*

## REFERÊNCIAS

- Filho, J.M. and Mamede, D.R. (2020). *Proteção de sistemas elétricos de potência*. LTC, second edition.
- Gonen, T. (2014). *Electric power distribution engineering*. CRC Press, third edition.
- Junior, G.C. and Ferreira, G.D. (2009). *Aplicação de dispositivos de proteção contra sobrecorrente em sistemas elétricos de distribuição*, 1.14 edition.
- Lundstrom, B., Chakraborty, S., Lauss, G., Bründlinger, R., and Conklin, R. (2016). Evaluation of system-integrated smart grid devices using software- and hardware-in-the-loop. In *2016 IEEE Power Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT)*, 1–5. doi:10.1109/ISGT.2016.7781181.
- Omar Faruque, M.D., Strasser, T., Lauss, G., Jalili-Marandi, V., Forsyth, P., Dufour, C., Dinavahi, V., Monti, A., Kotsampopoulos, P., Martinez, J.A., Strunz, K., Saeedifard, M., Wang, X., Shearer, D., and Paolone, M. (2015). Real-time simulation technologies for power systems design, testing, and analysis. *IEEE Power and Energy Technology Systems Journal*, 2(2), 63–73. doi: 10.1109/JPETS.2015.2427370.
- Omar Faruque, M.O. and Dinavahi, V. (2010). Hardware-in-the-loop simulation of power electronic systems using adaptive discretization. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 57(4), 1146–1158. doi:10.1109/TIE.2009.2036647.
- Short, T. (2004). *Electric power distribution handbook*. CRC Press LLC.
- Sparn, B., Krishnamurthy, D., Pratt, A., Ruth, M., and Wu, H. (2018). Hardware-in-the-loop (hil) simulations for smart grid impact studies. In *2018 IEEE Power Energy Society General Meeting (PESGM)*, 1–5. doi: 10.1109/PESGM.2018.8586357.
- Typhoon (2021a). Hardware. URL <https://www.typhoon-hil.com/hil-hardware/>.
- Typhoon (2021b). Hil scada. URL [https://www.typhoon-hil.com/documentation/typhoon-hil-software-manual/concepts/hil\\_scada.html](https://www.typhoon-hil.com/documentation/typhoon-hil-software-manual/concepts/hil_scada.html).
- Typhoon (2021c). Software download. URL <https://www.typhoon-hil.com/products/software-download/>.