

## Comparação de Performance entre IEDs DigitalTwin e Dispositivos Físicos através de Testes em Malha Fechada

**Paulo Sérgio  
Pereira (\*)  
CONPROVE**

**Paulo Sérgio  
Pereira Júnior  
CONPROVE**

**Gustavo Espinha  
Lourenço  
CONPROVE**

**Cristiano  
Moreira Martins  
CONPROVE**

**Gustavo  
Silva Salge  
CONPROVE**

**Rodolfo Cabral  
Bernardino  
CONPROVE**

### RESUMO

A disponibilidade de réplicas digitais em tempo real de dispositivos de proteção e controle oferece melhorias nos processos de comissionamento, permitindo testes antes ou durante a implementação da subestação. No entanto, antes de utilizar uma réplica virtual para validar os ajustes de proteção, é crucial verificar se os IEDs virtuais se comportam como os dispositivos físicos. O objetivo principal deste trabalho é submeter IEDs reais e as suas réplicas digitais a uma variedade de cenários de teste e comparar as respostas de ambos, de forma a concluir sobre os benefícios dessa tecnologia.

### PALAVRAS-CHAVE

DigitalTwin; Malha Fechada; IEDs; Comissionamento; Proteção; Manutenção

#### 1.0 - INTRODUÇÃO

Os gêmeos digitais são empregados em todo o ciclo de vida do produto para simular, prever e otimizar o produto e o sistema de produção antes de investir em ativos e protótipos físicos. Para a proteção de sistemas elétricos existe a possibilidade de configurar réplicas virtuais de IEDs reais através de uma plataforma virtual que permite que sejam realizados testes automatizados a partir da reprodução de arquivos COMTRADE.

A engenharia e comissionamento de uma subestação demanda muito tempo e frequentemente só pode ser realizada após os equipamentos da subestação terem sido entregues. Agora, os testes podem ser realizados antes ou durante a instalação da subestação real, permitindo a rápida verificação das configurações de proteção sem a necessidade de hardware adicional. Dispositivos de proteção conectados via GOOSE ou interface de proteção também podem ser simulados e testados, incluindo a comunicação entre eles.

Quando se fala em réplicas digitais, surgem várias dúvidas a respeito do comportamento desses dispositivos, tais como: O IED virtual é uma cópia fiel do IED real? Ele possui o mesmo comportamento, algoritmos e funcionalidades? As respostas que ele fornece são idênticas às do dispositivo físico? O objetivo deste trabalho é responder a essas perguntas através de resultados práticos de testes. A fim de realizar as comparações, foram feitos testes com ambas as metodologias (método convencional e DigitalTwin) nos esquemas de proteção implantados a um sistema com características similares à de um pertencente à rede básica nacional no que tange a níveis de tensão, geometria típica da linha de transmissão e níveis de curto-circuito, com foco na proteção diferencial de linha (87L).

#### 2.0 - DIGITAL TWINS

Modelos gêmeos digitais, ou "Digital Twins", são réplicas virtuais exatas de objetos, sistemas ou processos físicos. Utilizando dados em tempo real, sensores, algoritmos de aprendizado de máquina e simulações, esses modelos permitem a análise e a previsão do comportamento do sistema físico. A conexão constante entre o gêmeo digital e seu correspondente físico proporciona uma visão aprofundada de como o produto ou sistema opera sob diferentes condições, permitindo a identificação precoce de falhas, otimização de desempenho e manutenção preditiva.

A importância dos gêmeos digitais no desenvolvimento de produtos é significativa. Eles permitem uma inovação mais rápida e eficiente, pois os engenheiros podem testar e iterar em um ambiente virtual antes de implementar alterações no mundo real, economizando tempo e recursos. Além disso, com a capacidade de simular diferentes cenários e condições operacionais, as empresas podem antecipar problemas e ajustar seus produtos para melhorar a durabilidade, funcionalidade e satisfação do cliente. Essa abordagem não apenas acelera o ciclo de desenvolvimento, mas também reduz custos e minimiza riscos, tornando-se uma ferramenta essencial na engenharia moderna e na gestão de operações complexas.

(\*) Rua Visconde de Ouro Preto, n° 75 – CEP 38.405-202 Uberlândia, MG, – Brasil Tel: (+55 34) 3218-6800

E-mail: [paulo.junior@conprove.com.br](mailto:paulo.junior@conprove.com.br)

Um gêmeo digital é muito mais do que uma simulação, que é meramente uma previsão baseada em dados sobre como um ambiente/processo/pessoa/produto físico se comportará. Com os avanços contínuos na tecnologia digital, os gêmeos digitais estão se tornando mais robustos e mais importantes para as empresas. Em termos gerais, um gêmeo digital ajuda a resolver inúmeros problemas, tais como:

- Redução de tempo de inatividade: Tempo de inatividade, planejado ou não, pode custar muito dinheiro para uma empresa. Com a tecnologia do gêmeo digital, as empresas podem estar melhor preparadas para resolver problemas mais rapidamente ou evitá-los completamente.
- Eficiência operacional: Gêmeos digitais podem expor problemas anteriormente indetectáveis e guiar os gerentes a fazer melhorias baseadas em dados.
- Melhorias de produto: Designers de produto podem usar as percepções dos gêmeos digitais para melhorar o produto em futuras iterações ou descobrir oportunidades para novas linhas de produtos ou recursos com base nos dados de uso do produto.
- Melhoria da experiência do cliente: Gêmeos digitais podem ser usados para oferecer novas experiências e recursos aos clientes.
- Otimização das capacidades de serviço: Suporte a técnicos de serviço e clientes com orientações via realidade aumentada para fornecer serviço remoto especializado ou melhorar as taxas de solução na primeira tentativa.
- Qualidade consistente do produto: Como os gêmeos digitais têm um equivalente físico, os operadores podem ver dados e percepções detalhadas, encontrar padrões e resolver problemas de qualidade ou serviço de forma proativa.

Na área da proteção de sistemas elétricos, a tecnologia de gêmeos digitais vem sendo aplicada aos relés de proteção, que são chamados de IEDs. A ideia de um IED virtual como um gêmeo digital, ou seja, uma réplica digital em tempo real de um dispositivo físico, incluindo algoritmos, funcionalidades e interfaces de comunicação permite que serviços de comissionamento sejam executados em um ambiente digital, sem nenhum IED ou equipamento de teste físicos.

O IED virtual provê uma economia de tempo em diversas etapas:

- Implementação: planejamento e ajustes;
- Comissionamento: teste de aceitação em fábrica (FAT) e campo (SAT);
- Operação: manuseio do dispositivo;
- Treinamento: flexibilidade de acesso ao dispositivo em qualquer lugar;
- Manutenção e Serviços: análises de faltas.

A quebra de paradigma através dos testes em dispositivos virtuais gera também uma nova demanda de testadores, que não precisam mais estar atrelados a nenhum hardware. Com a geração e aquisição de dados totalmente digitais, os testes não estão mais limitados pela quantidade de saídas analógicas tampouco de entradas binárias de um hardware, permitindo a realização de testes simultâneos em múltiplos bays e a avaliação da seletividade.

O teste da proteção em um ambiente totalmente virtual, pode trazer inúmeros benefícios, tais como:

- Energização mais rápida de novos sistemas graças a prazos de execução mais curtos.
- Redução do OPEX (Operational Expenditure) com interrupções mais curtas para maior disponibilidade.
- Redução do CAPEX (Capital Expenditure) em equipamentos de teste.
- Suporte rápido e remoto com análise de falhas, reproduzindo facilmente o comportamento de produtos e sistemas.
- Treinamento flexível, contínuo e personalizado em ambiente de teste virtual com base em condições reais do sistema.

Neste trabalho, foi utilizado um software de simulação de transitórios eletromagnéticos, capaz de realizar testes automatizados em IEDs virtuais.

### 3.0 - SOFTWARE DE SIMULAÇÃO

O software PS Simul (Power System Simulator) [1], desenvolvido no Brasil desde 2009, possui uma versão GRATUITA disponível no site da empresa desenvolvedora. Este software, criado com o principal objetivo de permitir ao usuário modelar complexos sistemas elétricos de potência e controle além de simular transitórios eletromagnéticos e eletromecânicos, funciona com uma interface bastante amigável, com uma série de recursos que facilitam a obtenção e avaliação de resultados, entrada de dados, visualização de formas de onda, entre outros. Para possibilitar a criação de qualquer sistema de potência e/ou controle, está disponível uma biblioteca com mais de 400 componentes, incluindo vários não cobertos por nenhum outro software de simulação de transitórios. Além de realizar as simulações, o software permite a reprodução/aquisição dos sinais tanto pelas malas de teste quanto através da plataforma de IEDs virtuais da linha Siprotec da SIEMENS.

O PS Simul possui diversas funcionalidades que merecem destaque. Uma delas é o método de solução híbrida, que utiliza o método trapezoidal em conjunto com interpolação e Euler para evitar oscilações numéricas durante os chaveamentos. Além disso, o software permite o uso de variáveis globais, o que facilita a definição de ajustes comuns a

vários blocos em um único ponto. Também oferece a possibilidade de realizar múltiplos testes automatizados, permitindo a modificação de uma ou mais constantes do sistema. Outra funcionalidade importante é a simulação de faltas na linha de transmissão, que pode ser aplicada sem a necessidade de dividir manualmente a linha. O software também possibilita a simulação de curto-circuito em transformadores, permitindo o curto-circuito entre espiras do transformador através do acesso aos seus enrolamentos. Por fim, o software gera relatórios completos, fornecendo todas as informações relevantes de forma abrangente.

Como mencionado anteriormente, é possível reproduzir e adquirir sinais pelo PS Simul. Para isso, estão disponíveis na biblioteca de software os blocos de entradas e saídas para valores binários/GOOSE e analógicos/Sampled Values. Os componentes de saída são utilizados para que os resultados obtidos no ambiente de simulação possam ser reproduzidos em dispositivos reais ou virtuais. Os componentes de entrada serão utilizados para permitir que os sinais adquiridos pelos canais da mala de teste ou em ambiente virtual sejam utilizados no software.

Os sinais de entrada digital podem ser utilizados para realimentar a simulação através de um processo iterativo, executado de forma recursiva. Nesta metodologia, o sinal é aplicado, por exemplo, para modificar a simulação com o intuito de comandar a abertura e fechamento dos disjuntores ou em qualquer outro ponto do circuito que envolva lógica digital. Este processo de geração e aquisição de sinal ocorre por sobreposição automática de estágios com a realimentação do circuito, configurando assim um sistema de malha fechada em etapas com excelentes resultados. Vale ressaltar que esta metodologia só é possível devido à repetibilidade do TRIP dos IEDs, que possuem grande precisão na aquisição e processamento de sinais. Além disso, a eficácia do método iterativo para realização de testes em malha fechada já foi comparada com a metodologia utilizada por sistemas de simulação em tempo real [2, 3], onde se comprovou que os resultados dos testes em dispositivos de proteção são os mesmos para ambas as metodologias.

O software pode ser utilizado para realizar qualquer tipo de estudo eletromagnético, tais como coordenação de isolamento, descargas atmosféricas, tensões de recuperação transitórias, energizações, saturações de transformadores de corrente, partida de motores, sobretensões, qualidade de energia, lógicas de controle, etc.

#### 4.0 - ESTUDO DE CASO

A fim de realizar as comparações como em [4] para o barramento de processos, foram realizados testes com ambas as metodologias (método convencional e DigitalTwin), nos esquemas de proteção implantados a um sistema com características similares à de um pertencente à rede básica nacional no que tange a níveis de tensão, geometria típica da linha de transmissão e níveis de curto-circuito, com foco na proteção diferencial de linha (87L). O circuito modelado segue representado na Figura 1 e irá contemplar duas subestações representadas por seus sistemas equivalentes. Entre as subestações foi modelada uma linha de transmissão (classe de 500 kV) e, nos terminais da linha, incluso grupos de transformadores de instrumentos (TPs e TCs) e disjuntores, que neste estudo foram comandados externamente por relés SIEMENS - SIPROTEC 5 modelo 7SL.

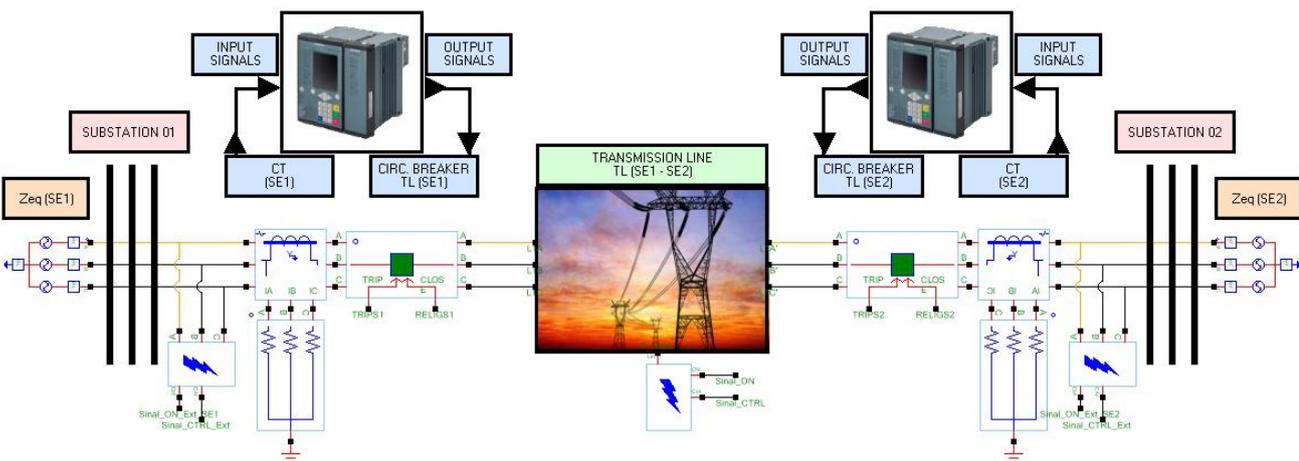


Fig. 1. Circuito de potência modelado no software PS Simul

No teste convencional, o PS Simul realiza a simulação do sistema modelado, enviando os sinais analógicos e digitais, direcionados para tal fim no ambiente do software, à mala de testes. Feito isso, a mala irá reproduzir os sinais (tensões, correntes e binárias) e aplicá-los nos relés 7SL. Ao mesmo tempo é feita a aquisição das binárias de saída dos IED's para que sejam consideradas (na abertura ou fechamento de disjuntores, por exemplo) na iteração posterior. Todas as conexões entre a mala de testes e os relés são feitas, nesta metodologia, através de cabeamento físico. Já no ambiente virtual, a mala de teste não é mais necessária e os IEDs reais são substituídos por suas réplicas digitais. O fluxo de sinais é realizado através de uma API. A Figura 2 ilustra o fluxo de sinais dos dois métodos.

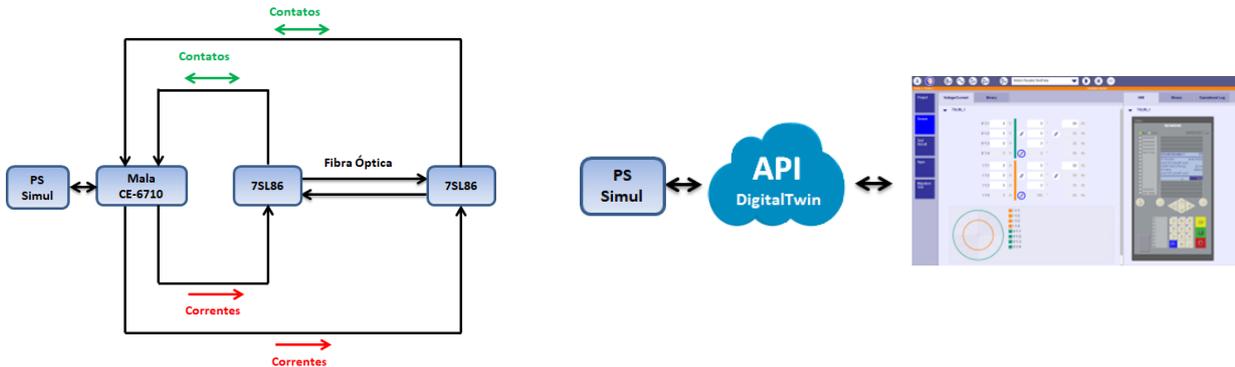


Fig. 2. Metodologia convencional versus virtual

O sistema elaborado foi submetido a um total de 260 cenários de teste, onde foram simuladas diversas condições de faltas com variação do tipo de defeito, ângulo de incidência e localização, visando comprovar o correto funcionamento do sistema de proteção. A Tabela I descreve resumidamente os cenários avaliados.

TABELA I. DESCRIÇÃO DOS TESTES REALIZADOS.

Casos	Descrição dos casos
50	Faltas internas com ângulo de incidência de 0° e 90° e religamento tripolar com e sem sucesso. Serão simuladas faltas a: 0%, 25%, 50%, 75% e 100% de SE1-SE2. Em cada local serão simulados diferentes tipos de falta.
50	Faltas internas evolutivas com ângulo de incidência de 0° e 90° e religamento tripolar com e sem sucesso. Serão simulados casos de falta a: 0%, 25%, 50%, 75% e 100% de SE1-SE2. Em cada local serão simulados diferentes tipos de falta. A evolução ocorre 1 ciclo após o início da falta.
30	Faltas internas com variação da resistência de falta, no meio da linha, para verificar a influência na atuação da proteção diferencial. Será considerado ângulo de incidência de falta de 0° e 90°, ajustando a resistência de falta com valores que variam de 5 Ω a 200 Ω. Para este caso deverá ser verificado religamento tripolar com sucesso.
10	Faltas externas nas entradas de SE1 e SE2, com ângulos de incidências de 0° e 90°. Para estes casos, deve-se verificar a não atuação da função 87L. Em cada subestação serão simulados diferentes tipos de falta.
40	Faltas externas nas entradas de SE1 e SE2, com saturação e com ângulos de incidências de 0° e 90°. Para estes casos, deve-se verificar a não atuação da função 87L. Em cada subestação serão simulados diferentes tipos de falta, para diferentes valores de resistência de burden, visando provocar saturações leves e pesadas.
10	Faltas externas seguidas de faltas internas, com ângulos de incidências de 0° e 90°. Para estes casos, deve-se verificar o religamento tripolar sem sucesso. Em cada subestação serão simulados diferentes tipos de falta, sendo a falta interna iniciada após 6 ciclos do início da falta externa.
40	Faltas externas com saturação seguidas de faltas internas, com ângulos de incidências de 0° e 90°. Para estes casos, deve-se verificar o religamento tripolar sem sucesso. Em cada subestação serão simulados diferentes tipos de falta, sendo a falta interna iniciada após 6 ciclos do início da falta externa. Serão provocadas saturações leves e pesadas variados os valores de resistência de burden visando provocar saturações leves e pesadas.
12	Faltas internas na condição de “switch on to fault”. Para estes casos deve-se verificar a atuação da função SOTF após a tentativa de energização da linha. As condições testadas serão: SOTF com terminal da SE1 Aberto: 0% e 100% de SE1 e SOTF com terminal da SE2 Aberto: 0% e 100% de SE1.
10	Verificar a resposta do relé para sub e sobre frequências (57 Hz e 72 Hz). Aplicar faltas de tipos variados a 50% com ângulo de incidência de falta de 0° e 90°. Para este caso deverá ser verificado religamento tripolar no modo sem sucesso.
8	Faltas sem comunicação, internas nas posições 0% e 100%, além de faltas externas.

Aplicar faltas com ângulo de incidência de 0° e 90°. Para este caso deverá ser verificado a atuação da proteção de sobrecorrente (emergência) e religamento no modo sem sucesso.
--

### 5.0 - COMPARAÇÕES

A Tabela II demonstra uma comparação entre as duas metodologias, através dos resultados obtidos na realização de testes de repetibilidade (20 repetições), no que tange aos tempos de atuação das funções de proteção dos relés, comprovando a equivalência de ambas nesse quesito. Com a análise da tabela, pode-se perceber que as diferenças dos tempos médios das atuações que ocorrem antes do religamento estão entre 3ms e 4ms que representa exatamente o tempo do contato físico do IED. Já após o religamento, existe um acréscimo nos valores que se justifica pela menor precisão do IED para a contagem do tempo de religamento que, apesar de resultar em diferenças de tempo pequenas, estas irão implicar em diferentes momentos de religamento gerando transitórios de reenergização distintos, ou seja, outros níveis de correntes transitórias serão lidos pelo IED resultando então em tempos de atuações díspares.

TABELA II. COMPARAÇÕES DOS TEMPOS DE ATUAÇÃO EM MILISSEGUNDOS DAS FUNÇÕES DE PROTEÇÃO DOS IED'S

SISTEMA SINAL		ANALÓGICO				VIRTUAL (DIGITALTWIN)				Δ Tméd.
		Tmín.	Tméd.	Tmáx.	σ	Tmín.	Tméd.	Tmáx.	σ	
TRIP (7SL86_1)	AR	11,800	<b>14,182</b>	17,250	1,59	8,050	<b>10,473</b>	12,050	1,28	3,71
	DR	12,450	<b>16,480</b>	20,800	2,64	12,950	<b>15,330</b>	17,950	1,67	1,15
SOTF (7SL86_1)	AR	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	DR	14,200	<b>20,100</b>	26,200	2,88	12,950	<b>16,128</b>	19,950	2,24	3,97
REC_79 (7SL86_1)		1032,4	<b>1035,6</b>	1039,9	2,25	1029,8	<b>1031,7</b>	1033,8	1,57	3,91
TRIP (7SL86_2)	AR	12,600	<b>14,540</b>	17,600	1,54	8,050	<b>10,320</b>	12,050	1,38	4,22
	DR	13,100	<b>17,157</b>	23,150	3,38	12,950	<b>15,725</b>	19,000	1,81	1,43
SOTF (7SL86_2)	AR	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	DR	15,750	<b>22,950</b>	29,950	4,19	12,950	<b>16,168</b>	19,950	2,41	6,78
REC_79 (7SL86_2)		1031,3	<b>1033,1</b>	1035,2	1,16	1034,0	<b>1036,4</b>	1038,1	1,27	3,29

*Tmín.* → Menor tempo de atuação do sinal entre todas as repetições;  
*Tmáx.* → Maior tempo de atuação do sinal entre todas as repetições;  
*TMéd.* → Média dos tempos de atuação do sinal entre todas as repetições;  
*σ* → Desvio padrão dos tempos de atuação do sinal entre todas as repetições;  
*ΔTMéd.* → Diferença entre as médias obtidas no simulador em tempo real e no simulador iterativo;  
**AR** → Ocorrência antes do religamento; **DR** → Ocorrência depois do religamento;

A Figura 3 mostra as montagens dos sistemas utilizados para realização dos testes, tanto com a metodologia convencional (a), quanto no ambiente virtual (b). Nesta figura constata-se a portabilidade da ferramenta, que possibilita a realização de testes reais em campo e teste em ambiente virtual em qualquer local, desde que haja conexão com a internet.



Fig. 3-(a) Metodologia convencional

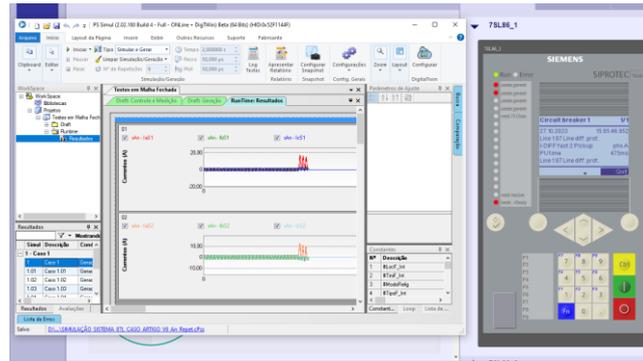


Fig. 3-(b) Ambiente virtual

## 6.0 - CONCLUSÃO

A criação de réplicas digitais em tempo real permite que testes sejam realizados em um ambiente controlado e seguro, sem a necessidade de interferir no sistema real. Para acompanhar a evolução dos IEDs, as ferramentas de teste também precisam evoluir, incorporando tecnologias de virtualização e automação. Ferramentas avançadas que incorporam capacidades de virtualização proporcionam não apenas redução de custos e riscos, mas também enorme flexibilidade.

O estudo apresentou, através da simulação de 260 cenários de contingências, uma comparação entre os resultados dos testes de IEDs comerciais e suas réplicas digitais, visando comprovar a correspondência entre os comportamentos do IED virtual e do real.

Através da comparação dos resultados obtidos com ambas as metodologias, no que tange aos tempos de atuação observados, pode-se concluir que as variações de tempo se basearam nos tempos de atuação do contato físico do IED que não existe no teste em ambiente virtual, demonstrando que o comportamento e os algoritmos são os mesmos.

Por fim, além de demonstrar e utilizar uma ferramenta portátil de extrema eficiência para testes em malha fechada, com baixo custo se comparada aos sistemas de simulação em tempo real, o artigo apresentou que os testes de proteção podem ser realizados sem a necessidade de um hardware conectado, ou seja, não existe mais limitação do número de canais de geração tampouco dos limites de tensão e corrente.

## 7.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Conprove Engenharia, Indústria e Comércio, PS SIMUL: Software para modelagem do sistema de potência e simulação de transitórios eletromagnéticos. Acessado em Agosto, 2024: <https://conprove.com/produto/08-ps-simul-software-para-modelagem-do-sistema-de-potencia-e-simulacao-de-transitorios-eletromagneticos/>
- (2) Pereira, P. S., Pereira Junior, P. S., Martins, C. M., Salge, G. S., Lourenço, G. E., Da Silveira, P. M., Davi, M. J. B. B., Guerrero, C. A. V., Reis Filho, F. A. Testes em Malha Fechada: Uma Comparação Entre Tempo Real e Método Iterativo; SNPTEE 2017; Brasil.
- (3) Pereira, P. S., Pereira Junior, P. S., Martins, C. M., Salge, G. S., Lourenço, G. E., Reis Filho, F. A., Davi, M. J. B. B. Testes Transitórios de Dispositivos de Proteção em Malha Fechada; STPC 2016; Brasil.
- (4) Pereira, P. S., Pereira Junior, P. S., Martins, C. M., Salge, G. S., Lourenço, G. E., Davi, M. J. B. B.. Avaliação da performance de uma proteção de linha implementada com barramento de processo (iec-61850-9-2) através de ensaios em malha fechada; ERIAC 2019; Brasil.

## 8.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Paulo Sergio Pereira Junior é o diretor da empresa CONPROVE, com sede em Uberlândia, Brasil, uma empresa de alta tecnologia com foco em pesquisa e desenvolvimento de instrumentos elétricos de teste. Graduou-se em Engenharia Elétrica em 2004 pela Universidade Federal de Uberlândia, UFU. Também se formou em Administração de Empresas em 2006 pela UFU, e concluiu MBA pela Fundação Getúlio Vargas, FGV, como especialista em Gestão de Projetos. Paulo tem mais de quinze



**XVII SEMINÁRIO TÉCNICO DE PROTEÇÃO E CONTROLE**  
14 a 17 de outubro de 2024  
São Paulo / SP



anos de experiência em Desenvolvimento e Aplicação em Projetos de Software e Hardware para Proteção, Automação e Controle de Sistemas de Potência na CONPROVE.

Promoção



Realização

