

Subestação Orientado a Objeto) e sincronização de tempo SNTP (Protocolo de Tempo de Redes Simples).

O Nível de vão é definido pelo modelo de dados e aplicações das funções do sistema, conforme capítulo 7 da norma [2]. O nível de processo é definido pelo capítulo 9 da norma [4] com os valores analógicos de tensão e corrente amostrados, trafegando pela rede. Essa separação em níveis é somente hierárquica. Na subestação tem-se apenas um enlace físico onde as informações são trafegadas.

A arquitetura de uma subestação compatível com a norma IEC61850 é composta por *switch* gerenciável, fibras óticas, relés de proteção inteligentes, roteadores, transformadores de corrente, de potencial e de força, capacitores, disjuntores, chaves, controladores, *gateway*, *SCADA* e *HMI*. Apresenta-se na Fig. 2 a arquitetura de uma subestação compatível com a norma IEC61850.

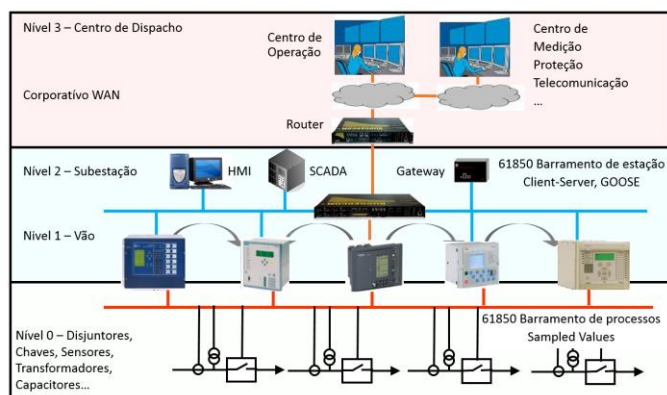


Fig. 2. Arquitetura de subestação compatível com a norma IEC61850.

O presente trabalho discorre sobre o projeto e implementação de uma plataforma didática, *Labprotec* [11], que foi projetada com equipamentos no seu estado da arte, estruturados conforme filosofia mostrada na Figura 2. Os equipamentos foram alocados, configurados e comissionados para fornecerem infraestrutura básica para simulação de situações reais de campo com base na norma IEC61850.

Em termos da estrutura deste trabalho, além desta seção introdutória, onde foi feita uma contextualização sobre o emprego da norma IEC61850, a Seção II ilustra um histórico de comissionamento de relés de proteção. A Seção III apresenta a plataforma didática *Labprotec*, ilustrando seus componentes e suas funcionalidades. Apresentam-se, na Seção IV, as simulações e os resultados obtidos a partir do emprego da plataforma. Por fim, a Seção V apresenta as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

II. HISTÓRICO DE COMISSIONAMENTO DE RELÉS DE PROTEÇÃO

Segundo [7], os primeiros relés utilizavam tecnologia eletromecânica. Estes dispositivos eram bastante simples se comparados com os relés atuais. Com o sistema de automação de subestação convencional, a manutenção periódica desempenha um papel fundamental nas ações das empresas. Para assegurar a correta operação dos dispositivos de proteção, testes periódicos de relés ou sistemas têm sido

necessários e em muitos casos obrigatórios. Geralmente, o período de avaliação pode ser de um até cerca de cinco anos, dependendo de fatores como a importância da subestação, o nível de tensão e a estratégia da empresa.

Para [8], os métodos tradicionais foram desenvolvidos com a hipótese que os usuários não teriam dispositivos de prova para testar os relés sob as mesmas condições do sistema de potência. Assim, os procedimentos de aferição foram desenvolvidos usando como componentes equipamentos de teste básicos, como *variacs*, defasadores e caixas de carga.

Segundo [5], com a evolução dos sistemas de proteção, são utilizados dispositivos numéricos de proteção, empregando cada vez mais relés microprocessados. Rapidamente, esses relés evoluíram para os dispositivos eletrônicos inteligentes (IED), que comparados com equipamentos de proteção eletromecânicos e estáticos, apresentam um caráter multifuncional.

Para [9], com o aumento da complexidade, os relés podem possuir mais de 2000 ajustes, e os métodos de verificação tradicionais não são mais apropriados. Além disso, as funcionalidades avançadas dos relés utilizam complexos modelos de rede para efetuar os cálculos e definir a atuação da proteção.

De acordo com [6], a vida útil da automação de subestação começa na especificação, na oferta do sistema do fornecedor para a engenharia, fabricação e comissionamento do sistema, incluindo Testes de Aceitação em Fábrica e Testes de Comissionamento. A vida útil da manutenção se inicia juntamente com a operação do sistema de automação de subestação. A manutenção inclui detecção e reparo de todas as falhas para manter o sistema em operação até sua desativação.

Diversos autores de trabalhos têm registrados os tipos de avaliações a serem observadas num comissionamento, dependendo do local ou objetivo. Em linhas gerais, os principais são: Teste de Aceitação em Fábrica (FAT), Comissionamento e Teste Planejado de Manutenção.

III. A PLATAFORMA DIDÁTICA LABPROTEC

O Projeto técnico da plataforma *Labprotec* contempla a construção de um painel de proteção compatível com a norma IEC61850 onde serão executados os testes de comissionamento de proteção e automação. O painel contém equipamentos no seu estado da arte e proporciona uma infraestrutura básica para o desenvolvimento de algoritmos e lógicas de automatismo e intertravamentos. Os equipamentos e dispositivos que compõem o painel *Labprotec* são: um relé de distância e um relé diferencial de transformador, ambos doados pela *Schneider Electric*; um *switch ethernet*; duas gigas de testes que simulam disjuntores; fontes de alimentação em corrente alternada e contínua; e fibras óticas. A Fig. 3 apresenta uma visão geral da plataforma *Labprotec*.

Foram elaboradas duas aplicações típicas, uma para vão de transformador e outra para vão de linha conforme ilustra a Fig. 4, que consiste no diagrama unifilar simplificado da plataforma *Labprotec*.

torno de 3 ms e não podem ultrapassar os 16 ms conforme [10]. Pode-se observar na Fig. 7 a existência de atrasos em cada parte do processo. Não é mensurado pelo autor quanto tempo é gasto em cada parte do processo.

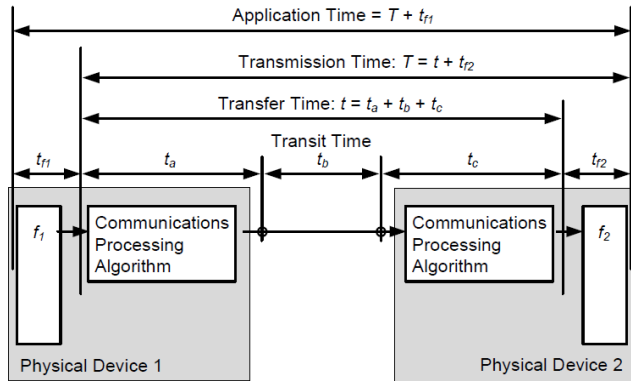


Fig. 7. Tempo de propagação do GOOSE.

De acordo com a Fig. 8, verificou-se que, no pior caso, a diferença entre os 2 testes foi em torno de 1 ms, comprovando assim a altíssima eficácia e confiabilidade das mensagens GOOSE de alta prioridade, podendo ser utilizadas para aplicações como intertravamentos lógicos e automatismos funcionais, bem como transferências de *trips*, ajustes e bloqueios.

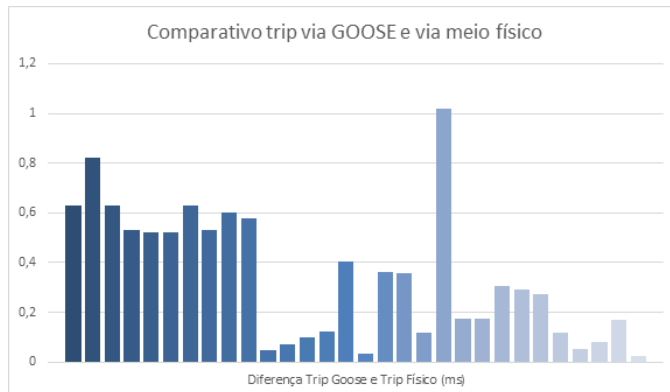


Fig. 8. Diferença de tempo entre o *trip* via GOOSE e via físico em milissegundos.

Outro teste interessante é o teste de sobrecarga de GOOSE tal como uma rede com diversos relés de proteção cada um configurado com muitas mensagens a serem enviadas em um intervalo pequeno de tempo. Por exemplo: uma grande subestação digitalizada com 20 vãos, com 1 relé por vão totalizando 20 relés. Cada um desses relés possui 30 *datasets*, ou seja, 30 mensagens diferentes. Se todas essas mensagens fossem atualizadas a cada 100 ms ou a cada 500 ms, resultariam nos números mostrados na Tabela I, para 2 situações.

TABELA I
Cálculo da taxa de mensagens por segundo

Situação	Quantidade				
	Relés	Mensagens	Atualizações	Mensagens por segundo	Tráfego
1	20	X 30	X 4	2.400	Médio
2	20	X 30	X 20	12.000	Pesado

Se cada mensagem possui 200 *bytes*, na situação 2 o tráfego seria de 19,2 Mbits/s, ou seja, seria necessário um *switch* de 100 Mbits/s no mínimo para comportar esse tráfego.

Considerando a situação 1, com 12.000 mensagens por segundo, o período entre uma mensagem e outra seria de 83,33 μ s. Esse é o tempo que o processador deve concluir a análise da mensagem atual para atender e analisar a próxima mensagem. Uma pequena sobrecarga em um curto espaço de tempo seria amortecida pelas memórias dos *buffers* de recebimento enquanto o processador realiza as tarefas de interpretar as mensagens.

Foram realizados 3 testes, um com a rede sem carregamento, outro com a rede sobrecarregada e um terceiro com separação de virtual LANs. Foi utilizado a função falha de disjuntor, 50BF, com inércia de 100 ms. Na Fig. 9 mostra-se os resultados dos 3 testes em 10 disparos.

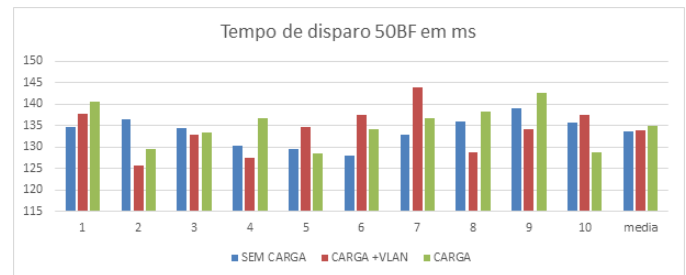


Fig. 9. Comparativo entre mensagens GOOSE em redes sobrecarregadas e não carregadas.

Sendo assim, mesmo em uma condição extremamente inóspita realizada no terceiro teste, a diferença média em relação ao teste de referência com a rede sem carga foi de apenas 1,26 ms em média, relativamente pequena, visto que significa menos do que um décimo de ciclo, consolidando assim a tecnologia.

B. Comissionamento de relé de distância

Para realizar o comissionamento do relé de distância P442, utilizaram-se as ferramentas *Micom S1 Studio* e *Micom Zgraph* para desenhar a característica quadrilateral do relé e, em seguida, a caixa de testes para realizar a montagem e a busca das fronteiras das zonas de proteção do relé de distância. Observa-se na Fig. 10 a arquitetura montada para viabilizar o teste.

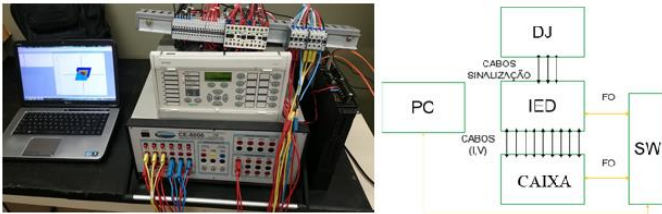


Fig. 10. Teste de comissionamento de relé de distância.

Foi realizado, como exemplo, o comissionamento de uma linha de transmissão com impedância característica de 2,4 ohm e ângulo característico 70 graus, onde foram verificadas as 4 zonas de proteção ajustadas tanto para curto-circuito fase-terra como para curto-circuito entre fases. Mostra-se na Fig. 11 a curva característica da linha de transmissão configurada na caixa de testes.

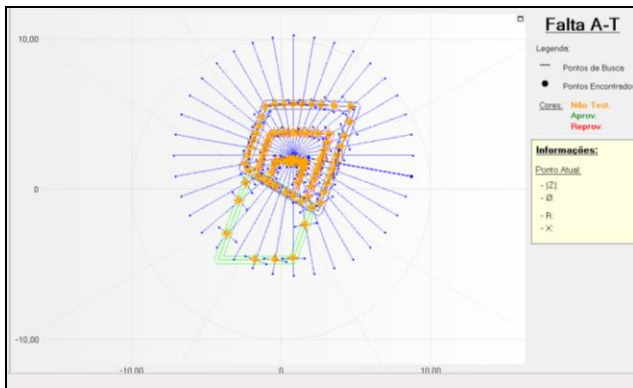


Fig. 11. Curva característica das zonas programadas no relé de distância.

Com o auxílio do programa wavewin (Schneider Electric) pode-se observar a oscilografia extraída do relé de distância. Verifica-se a atuação instantânea da 1ª zona do relé de distância e observa-se na Fig. 12 que o curto-circuito simulado foi fase-terra (B-T), com uma corrente de 2,395 A (valor eficaz) e ângulo 319°.

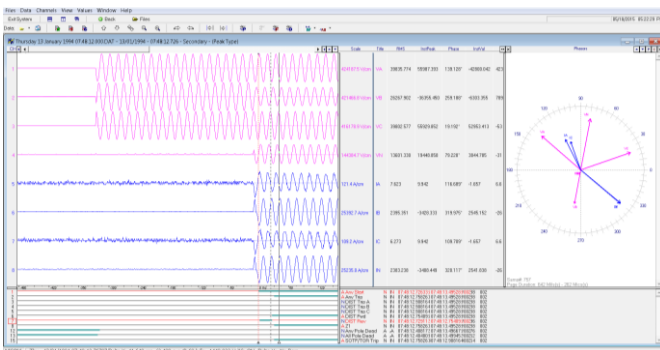


Fig. 12. Oscilografia da atuação do relé de distância em 1ª zona.

C. Teste de integração da plataforma com supervisório

Foi realizado o teste de integração da plataforma com o supervisório SAGE utilizando o protocolo vertical MMS para troca de informações entre os Relés de Proteção e o SCADA. Para isso, empregou-se a filosofia cliente-servidor em que as informações foram coletadas através de aquisição dos data

sets e os comandos foram enviados de acordo com seus respectivos *report control block*. Na Fig. 13 mostra-se a arquitetura de comunicação utilizada.

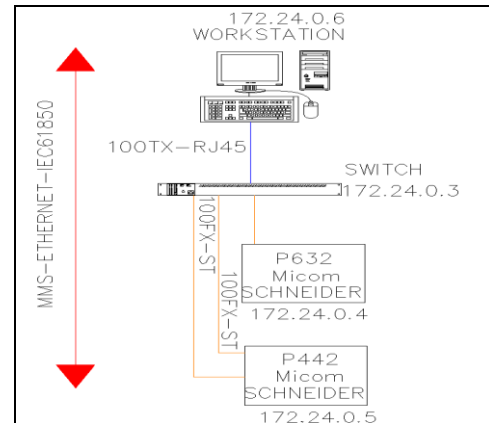


Fig. 13. Arquitetura de integração da plataforma com o sistema supervisório.

Diversos testes foram realizados, tais como sinalização de abertura e fechamento, mola descarregada, falha de bobina de abertura do disjuntor, atuação de relé de gás do transformador, o bloqueio de neutro assim como as atuações das zonas de proteção de distância, diferencial e sobrecorrente, sinalização dos pontos analógicos de corrente, tensão, potência ativa, reativa e fator de potência. Na Fig. 14 pode-se observar as telas comissionadas do supervisório.

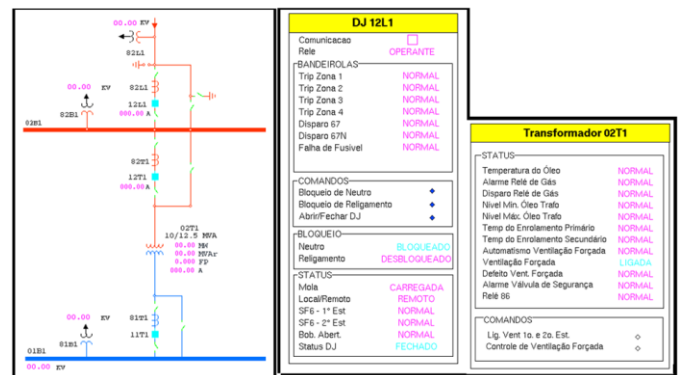


Fig. 14. Telas configuradas no supervisório.

V. CONCLUSÕES

O desenvolvimento do trabalho proposto, concretizado no projeto de uma plataforma didática de comissionamento de sistemas digitais de controle e proteção, compatível com a norma IEC61850, propiciou a infraestrutura de comunicação de dados e redes de computadores que possibilita a experimentação, medição, análise e avaliação da aplicabilidade da norma IEC61850 na automação de sistemas de proteção e controle de uma subestação de energia elétrica.

O trabalho trouxe informações do estado da arte na área de proteção e automação do setor elétrico de forma contextualizada, bem como obteve caráter bem prático, uma vez que foram realizados diversos testes de comissionamento e comparativos de desempenho de técnicas consagradas com novas técnicas propostas pela norma IEC61850.

O projeto desenvolvido possibilitou mostrar o resultado comparativo entre a agilidade das mensagens GOOSE em relação à sinalização convencional com o meio físico par trançado. Mesmo em condições de sobrecarga na rede, as mensagens GOOSE são entregues no destino final com menos de um décimo de ciclo de onda, mostrando que as mensagens de alta prioridade não são afetadas. No pior caso foi verificado que o atraso das mensagens não ultrapassou os 3ms estabelecido pela norma, ou seja, 5 vezes menor que 1 ciclo de onda de 16 ms.

O trabalho mostra-se inovador visto que desenvolveu uma plataforma didática que pode ser aplicada em estudos alinhados com a norma IEC61850. A crescente necessidade de automatismos e intertravamentos lógicos dentro de uma subestação abrem portas para trabalhos futuros com sistemas de controle das subestações que devem estar preparados para tomar decisões preliminares, mediante uma falta, e diminuir a dependência de comunicação entre o centro de controle e as subestações remotas. Dentre as aplicações a serem implementadas em trabalhos futuros tem-se transferência automática de linhas, recomposição automática de barras e paralelismo de transformadores.

VI. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Schneider Electric pela doação dos relés de proteção, os quais foram utilizados neste trabalho e são utilizados nas aulas de graduação e pós-graduação da UFRN. Também agradecem à Cosern por disponibilizar a caixa de injeção de corrente e tensão hexafásica a qual foi utilizada para realizar o comissionamento dos relés de proteção.

VII. REFERÊNCIAS

- [1] International Electrotechnical Commission, "IEC TR 61850-1 Communication Networks and Systems in Substations. Part 1: Introduction and overview," Suíça, 2002.
- [2] International Electrotechnical Commission, "IEC TR 61850-7 Communication Networks and Systems in Substations. Part 7. Principles and models, common data classes," Suíça, 2002.
- [3] International Electrotechnical Commission, "IEC TR 61850-8 Communication Networks and Systems in Substations. Part 8: Specific communication service mapping (SCSM)-Mappings to MMS," Suíça, 2002.
- [4] International Electrotechnical Commission, "IEC TR 61850-9 Communication Networks and Systems in Substations. Part 9: GOOSE," Suíça, 2002.
- [5] M. E. C. Paulino, "Testes de Relés de Proteção Baseados na IEC61850," in *Proc. 2006 Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos*, Campina Grande, Brasil, 2006.
- [6] W. Bass, "Life-time Maintenance Strategies for SA Systems today and tomorrow," *Study Committee B5 Colloquium*, October 2009.
- [7] Petrini, "The impact of digital technology on the maintenance of Substation Automation Systems," *Study Committee B5 Colloquium*, October 2009.
- [8] Giuliani, "ATG Exodus," <http://www.atgx.com/nssfolder/dynamicrelaytestingpaper>.
- [9] S. Schwabe, "New Approach to Simulation Based Type Testing of Protection Relays," in *Proc. 2011 OMICRON International Protection Testing Symposium*, 2011.
- [10] Dolezilek, "Design and Validation Practices for Ethernet Network to Support Automation and Control Applications," *Schwitzer Engineering Laboratories*, 2014.

- [11] M. C. Fontes, "Projeto de Plataforma Didática Compatível com a Norma IEC61850 para Comissionamento de Sistema Digital de Controle e Proteção de Subestação de Energia Elétrica," *Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Brasil*, 2015.

VIII. BIOGRAFIAS



Marcos Antonio Dias de Almeida nasceu em Várzea - RN, Brasil, em 24 de fevereiro de 1954. Graduiu-se em Engenharia Elétrica na Universidade Federal do Rio Grande do Norte em 1978. Concluiu, em 1980, o Mestrado na Área de Sistemas de Energia Elétrica, na Escola Politécnica da USP e o Doutorado, em 2004, no Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e de Computação da UFRN - PPGEEC. Atualmente, é Professor Titular do Departamento de Engenharia Elétrica e do Mestrado Profissional em Energia Elétrica, ambos da UFRN.



Marcel da Costa Fontes nasceu em Natal, Brasil, em 14 de junho de 1989. Graduiu-se em Engenharia Elétrica na Universidade Federal do Rio Grande do Norte em 2011 onde, em 2015, concluiu mestrado profissional em engenharia elétrica. Atuou como engenheiro de automação na empresa multinacional Schneider Electric de 2011 a 2013 e desde 2013 atua como engenheiro eletricitista especialista em operação em tempo real da empresa Neoenergia Cosern.



Arrhenius Vinicius da Costa Oliveira nasceu em Natal, Brasil, em 19 de abril de 1979. Graduiu-se em Engenharia Elétrica na Universidade Federal do Rio Grande do Norte em 2001, onde, em 2004 e 2011, concluiu, respectivamente, Mestrado e doutorado na Área de Sistemas de Energia Elétrica. Entre os anos de 2001 e 2008, atuou como engenheiro eletricitista na Cosern. Iniciou a carreira docente em 2008 no Instituto Federal do Rio Grande do Norte, onde permaneceu até 2011. Desde 2011, é professor da UFRN.