

NOVO SISTEMA DIGITAL DE PROTEÇÃO E AUTOMAÇÃO DE SISTEMA ELÉTRICO DE DISTRIBUIÇÃO DE UMA REFINARIA DE PETRÓLEO BASEADO EM IED E EM PROTOCOLO IEC 61850

Eng. ROBERVAL BULGARELLI - PETROBRAS - RPBC - REFINARIA PRESIDENTE BERNARDES DE CUBATÃO

Resumo - O novo sistema digital de proteção e automação a ser implementado no sistema elétrico da RPBC - Refinaria Presidente Bernardes de Cubatão, da PETROBRAS, será construído utilizando-se de IEDs, interligados em rede de comunicação de dados Ethernet, utilizando protocolo baseado nos padrões estabelecidos na recente série de Normas IEC 61850. Este trabalho descreve os ensaios realizados no Laboratório de Proteção de Sistema Elétricos da EPUSP, onde o novo sistema elétrico foi simulado e ensaiado, sendo executadas as lógicas de proteção e controle requeridas, implementadas através de mensagens prioritárias de proteção do tipo GOOSE, em situações de saturação da capacidade de tráfego de rede, de forma a verificar o desempenho destas funções.

1. Introdução

A Refinaria Presidente Bernardes de Cubatão (RPBC) as PETROBRAS encontra-se atualmente em processo de implementação de grandes alterações no seu sistema elétrico de recebimento e de distribuição de força. O novo sistema de distribuição receberá alimentação em 230 kV, proveniente da UTE (Unidade Termo Elétrica de Cogeração à gás natural – 220 MW – 230 kV) e distribuirá a energia em 13.8 kV, a partir de 3 novos Centros de Distribuição de Carga, denominadas subestações SE C-17, SE C-14 e SE C-03. A RPBC possui dezenas de subestações unitárias instaladas em seu parque industrial, as quais alimentam as diversas unidades de processamento de petróleo e de tratamento de derivados, apresentando um consumo de cerca de 40 MW.

A arquitetura para este novo sistema de proteção e automação a ser implantado será baseado em uma rede de IEDs (*Intelligent Electronic Devices*) e *Switches* Ópticos gerenciáveis, com redes de comunicação no padrão Ethernet TCP/IP. No nível superior de automação do sistema elétrico, serão utilizados servidores com protocolo OPC Server, que permitirá a interoperabilidade dos diferentes sistemas digitais de controle elétrico, inclusive futuros, através de uma mesma plataforma operacional.

Será utilizado neste novo sistema digital um protocolo de comunicação aberto padronizado por normas internacionais da IEC, seguindo os padrões estabelecidos pela recente série de Normas IEC 61850 - Communication networks and systems in substations [1], as quais permitem a implementação dos requisitos e funcionalidades especificados para este sistema de proteção e automação elétrica.

Com base nesta nova concepção e arquitetura, serão residentes nos IEDs, e não mais em UTRs (Unidades Terminais Remotas), todas as lógicas de automatismos, intertravamentos e proteção requeridos, os quais permitirão também as funções de monitoração e controle remotos do sistema elétrico envolvido.

O laboratório de proteção de sistemas elétricos da Escola Politécnica da USP (L-PROT) está equipado com cerca de 15 IEDs, com capacidade de comunicação de dados utilizando o protocolo IEC 61850, além de *switches* ópticos, conversores de protocolo, GPS e caixas de calibração de relés. Todo este *hardware* disponível foi utilizado para a simulação da arquitetura do novo sistema de proteção e automação e para a realização de uma série de ensaios de desempenho sobre as redes de comunicação constituídas por estes IEDs.

Dentre os principais objetivos dos ensaios realizados, destacam-se os seguintes:

- Configuração, implementação, parametrização, simulação de operação e ensaios de um sistema digital de automação e proteção elétrico baseado em IEDs, com redes de comunicação com protocolo aberto, com uma configuração de fato distribuída, não baseada em UTR ou em protocolos proprietários.
- Implementação, simulação de operação e ensaios de uma plataforma de IEDs baseada em rede de comunicação Ethernet, com protocolo conforme o padrão IEC 61850.

- Verificação de viabilidade e de desempenho de um sistema digital de proteção, intertravamento, automatismo, comandos e monitoração baseado em mensagens priorizadas, enviadas através de rede de comunicação, diferentemente da forma tradicional até então utilizada, onde os sinais de intertravamento e proteção são enviados através de circuitos físicos dedicados, constituídos por fiação de cobre, interligando diretamente os circuitos de comando dos disjuntores.
- Implementação, simulação de operação e ensaios de desempenho de um sistema de automação e proteção baseado em IEDs, considerando o tráfego de sinais através de redes de comunicação envolvendo diferentes subestações, com localizações geográficas distintas.
- Ensaios de verificação de degradação de tempo de atuação de funções de proteção, com comandos virtuais enviados através de mensagens prioritárias, padrão GOOSE (Generic Object Oriented Substation Event), conforme norma IEC 61850, encaminhados através da rede de comunicação Ethernet, em situações críticas de saturação da capacidade de tráfego dos *switches* ópticos e dos IEDs que necessitem receber estes comandos.

2. Características do atual sistema de automação elétrico da Refinaria Presidente Bernardes

A RPBC possui atualmente instalado um sistema digital de controle e monitoração distribuído, denominado SCMD, o qual monitora e controla centralizadamente através do seu Centro de Operações, as subestações de entrada, subestações de distribuição e subestações unitárias das unidades de processo, integrantes do seu sistema elétrico de energia, em 88 kV e 4.16 kV.

Este sistema digital de automação, instalado por volta de 1996 é baseado na instalação de UTR (Unidades Terminais Remotas), em cada uma das diversas subestações monitoradas, as quais interfaceam os cubículos e gavetas dos painéis existentes através de fiações físicas dos circuitos de monitoração e controle. Os circuitos de monitoração ou controle são endereçados a entradas e saídas, digitais ou analógicas de cartões de I/O existentes nas UTRs. O sistema digital atualmente existente monitora e controla um total de cerca de **9.500** pontos discretos, distribuídos em diversas UTRs, instaladas nas diversas subestações unitárias existentes no sistema elétrico da Refinaria Presidente Bernardes.

A lógica de programação dos programas de monitoração e controle residem nas CPUs existentes nas UTRs, as quais também recebem instruções provenientes dos operadores do Centro de Operações.

As diversas UTRs são interligadas através de uma Via de Comunicação de Dados, redundante, com configuração em anel. A operação de cada um dos dois anéis de enlace é do tipo unidirecional, onde a perda de um dos nós da rede ou o dano de um trecho de fibra ocasiona a perda de todo o anel.

O protocolo utilizado na rede de comunicação de dados é do tipo proprietário, elaborado pelo fabricante do sistema e específico para este modelo de sistema de automação.

Em função da velocidade do desenvolvimento da tecnologia digital e de proteção e automação elétrica, o sistema instalado há cerca de 10 anos já é considerado “clássico” pelo fabricante, estando fora da linha normal de fabricação.

3. Características e arquitetura do novo sistema de proteção e automação elétrico da Refinaria Presidente Bernardes

O novo sistema elétrico da RPBC será constituído basicamente por uma subestação de entrada com recebimento em 230 kV (SE C-17) e Centros de Distribuição de Carga em 13.8 kV (SE C-17, SE C-14 e SE C-03). A partir destes centros de distribuição serão distribuídos circuitos alimentadores para as diversas subestações unitárias existentes nas diversas unidades de processamento de petróleo, tratamento de derivados, tratamento de efluentes e parque de tanques e esferas de armazenamento de produtos existentes na Refinaria.

O recebimento desta energia será realizado através da subestação SE C-17, a qual possuirá três transformadores de 230/13.8 kV e três painéis de distribuição em 13.8 kV, com nível de curto circuito de 31.5 kA. Estes painéis possuirão interligação através de uma barra de paralelismo, para fins de flexibilidade na configuração do sistema e permitir um maior grau de confiabilidade.

A partir desta SE C-17 serão encaminhados circuitos alimentadores para outras duas subestações do tipo Centro de Distribuição de Carga, denominadas SE C-03 e SE C-14. A partir das subestações SE C-03, C-14 e C-17 serão distribuídos circuitos alimentadores em 13.8 kV para as diversas subestações unitárias

de áreas de processo existentes na RPBC, localizadas nas proximidades destas 3 subestações do tipo Centro de Distribuição de Carga.

Foi definido pela engenharia elétrica da Petrobras que o novo sistema digital de proteção e automação a ser implementado será baseado na utilização do protocolo de comunicação IEC 61850, residente em cada IED, interligados através de *switches* ópticos, em rede padrão Ethernet. O sistema de proteção e automação será constituído por uma rede de comunicação de dados interligando os *switches* ópticos, com cabos de fibra óptica, redundante, em anel, bidirecional. Esta rede será utilizada para as funções de engenharia, rede de dados de monitoração e controle e rede dados para sinais de proteção / intertravamento entre IEDs.

Existirá também uma segunda rede dedicada à função de sincronismo de tempo, através de GPS / entradas IRIG B.

Existirá ainda uma terceira rede, constituída por IEDs de proteção de motores, para comunicação de dados de monitoração e controle diretamente com o sistema digital de controle distribuído (SDCD), também existente no sistema de automação de processo da RPBC.

Foram configuradas para a realização deste ensaio, através do *software* de configuração, monitoração e controle dos IEDs, as telas de controle e monitoração das 3 subestações principais.

Foi utilizada para a execução destes ensaios, uma rede de comunicação composta pelo seguinte *hardware*, disponível no laboratório de proteção da EPUSP (L-PROT): Sistema GPS de fabricação REASON, 16 IEDs, 3 *Switches* Ópticos e 1 Conversor de Protocolo, todos de fabricação GE/MULTILIN, interligados através de cabos de fibra óptica do tipo multimodo. Foi também utilizada uma caixa de calibração de relés de fabricação OMICRON.

Todos os IEDs, *switches* ópticos e conversor de protocolo, disponíveis no laboratório foram adequadamente interligados em redes, de tal forma a simularem a configuração básica das 3 novas subestações a serem construídas, conforme arquitetura simplificada apresentada na Figura 1.

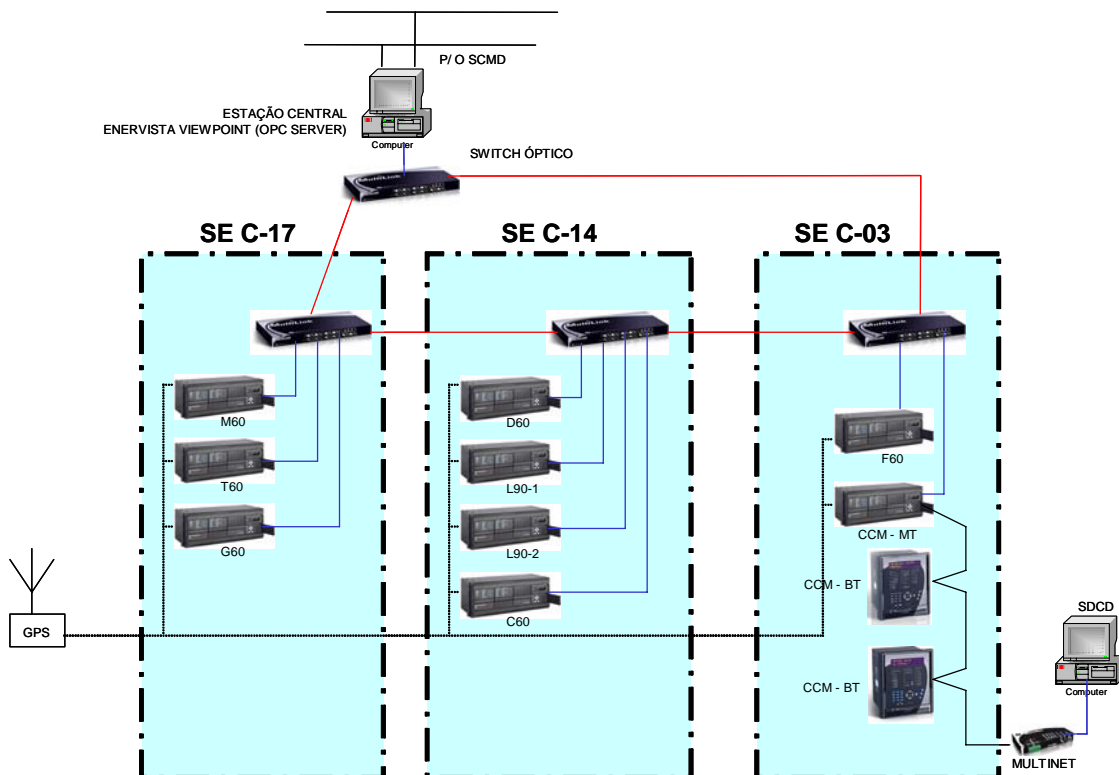


Figura 1 - Rede de IEDs e switches implementada para a simulação do novo sistema de proteção e automação elétrica da RPBC

Foram integrados em rede, simulando a rede de IEDs para motores a ser instalada na SE C-03, 2 IEDs disponíveis, através de conversor de protocolo *Modbus* ou *Profibus*, de forma a simular uma rede para comunicação de dados requerida para controle do processo de refino de petróleo e tratamento de derivados e de efluentes.

4. O protocolo de comunicação de acordo com as normas IEC 61850

A IEC - International Electrotechnical Commission desenvolveu recentemente as Normas da série IEC 61850, reconhecendo a necessidade de elaborar um padrão abrangendo redes de comunicação e sistemas em subestações, e desenvolveu um padrão que permite a interoperabilidade de IEDs de diferentes origens e que apresenta um grau de confiabilidade adequado com suporte às funções específicas da automação elétrica.

Dentre os benefícios esperados do protocolo IEC 61850 podem ser citados:

- Aumento da produtividade dos dispositivos e do sistema
- Redução dos custos, com menor custo total do usuário.
- Justificativa para planejamento de operações baseada em comunicação de dados defensável.
- Aumento no desempenho da segurança e disponibilidade da rede de dados
- Vantagens competitivas entre outros protocolos

Diferentemente dos outros protocolos até então disponíveis, orientados à aquisição de dados e comandos remotos, o padrão IEC 61850 aborda a automação como um conjunto de funções que possam interoperar de forma distribuída, onde as funções possam estar alocadas em diferentes dispositivos físicos, os que podem estar geograficamente distribuídos e conectados em rede. Ao mesmo tempo, este padrão utiliza estes mesmos princípios para a integração, numa mesma rede de dispositivos, de funções de medições, controle e proteção.

O objetivo do protocolo IEC 61850 é permitir uma integração das informações de campo utilizando padrões abertos e não proprietários, visando a redução dos custos de engenharia, comissionamento, monitoramento, diagnóstico e manutenção. Ao mesmo tempo este padrão tem compromisso com as exigências de desempenho, suportando futuros desenvolvimentos.

5. A função GOOSE do protocolo IEC 61850

A mensagem original GOOSE (Generic Object Oriented Substation Event) do protocolo **UCA** - Utility Communications Architecture [2] utiliza o frame de Ethernet do tipo OSI, e não fornece prioridade adequada para tagueamento normalmente encontrado nos sistemas do tipo Ethernet II.

Os recentes esforços de normalização da IEC, contidos na Norma IEC 61850-7-2 resultaram em um grande número de melhorias sobre a especificação GOOSE original. Os detalhes destas melhorias podem ser resumidos conforme a seguir:

- Um único tipo de frame Ethernet foi reservado com o IEEE
- O tagueamento do nível de prioridade 2 foi adicionado à especificação desta função, tornando-o possível de isolar o tráfego de mensagens de proteções críticas no tempo, de mensagens não críticas, provenientes de IHM, SCADA e outros tráfegos de rede de prioridade mais baixa.
- A mensagem GOOSE da IEC suporta Virtual LANs ou VLANs. Uma VLAN é um grupo de dispositivos que residem em um mesmo domínio de broadcast, isto é, se uma mensagem Ethernet de broadcast é enviada sobre uma particular VLAN, somente dispositivos configurados sobre aquela particular VLAN verão aquela mensagem de broadcast.
- Mensagem foi dividida em dois subtipos e renomeadas conforme a seguir:
 - **GSSE** (Generic Substation Status Event) é um novo nome para o formato deste tipo de mensagem, que é compatível com a mensagem GOOSE do protocolo UCA 2.0.
 - **GOOSE** (Generic Object Oriented Substation Event) é o nome dado para o novo frame de dados melhorado da IEC (embora aparentemente confusa, esta abordagem de nomeação não deve trazer maiores impactos na comunidade de usuários, e é esperado que ele seja utilizado pelos fabricantes de dispositivos).

- A nova função GSSE da IEC foi tornada mais simples, pela eliminação de algumas das informações de cabeçalho associadas com a especificação original da GOOSE da UCA.
- A nova função GSSE da IEC removeu a especificação do bloco DNA e do bit de paridade, convertendo o carregamento de dados total do usuário em um pool de dados que pode ser livremente configurado para transferir qualquer tipo de informação (bits lógicos, caracteres, bytes, números inteiros, números com ponto flutuante, etc.)
- A nova função GSSE da IEC suporta serviços adicionais para a interrogação de dados de nomes de elementos individuais (auto descrição)
- A nova função GOOSE permite que o comprimento da mensagem seja configurável, desta forma estendendo o comprimento da função GSSE IEC do tamanho original de 259 bytes até o máximo permitido pelo tamanho de frame da Ethernet (1518 bytes). A limitação original de que toda a informação necessita estar contida dentro de uma única mensagem GOOSE foi mantida.

6. Considerações sobre o padrão IEC 61850 nos relés da linha de IED's utilizados

A linha UR (Universal Relays) de relés de proteção de fabricação GE suporta o protocolo MMS (*Manufacturing Message Specification*) conforme especificado pelo padrão IEC 61850.

O MMS é suportado sobre dois empilhamentos de protocolo: TCP/IP sobre Ethernet e TP4/CLNP (OSI) sobre Ethernet.

Os relés desta linha UR, utilizados nestes ensaios, operam como servidores IEC 61850. Estes IEDs trocam informações binárias através do formato Remote I/O's, diretamente no cartão da CPU, com velocidade de 10 ou de 100 MBits/s.

É possível selecionar o método de transferência de bits de informação entre relés usando as ferramentas Remote I/O's, que pode ser selecionado para ser executado através dos padrões de mensagens prioritárias GOOSE (*Generic Substation Status Event*), especificado na IEC 61850. A conformidade de atendimento dos requisitos e especificações das normas IEC 61850, para os IEDs desta linha UR são certificados por laboratório de ensaios de terceira parte.

As mensagens GOOSE são eficientes e prioritárias, pois fazem uso de tag de prioridade Ethernet e dos benefícios das funcionalidades da VLAN (Virtual LAN). Para o adequado e efetivo funcionamento das trocas de mensagens entre IEDs, faz-se necessário que todos os IEDs adotem este mesmo método de priorização, tagueamento e funcionalidade.

A VLAN é um grupo de nós lógicos que residem em um domínio de *Broadcast* comum. Existe a possibilidade de se criar Port VLAN (mesmo *switch*) ou Tag VLAN (múltiplos *switches*). A presença de mensagens de nós lógicos, oriundos de dispositivos tais como IEDs ou computadores, que não pertençam a uma determinada VLAN têm seus pacotes de dados rejeitados.

Foi adotada nestes ensaios a configuração de VLAN do tipo Tag, pois permite a utilização de roteadores de rede e permite que possam ser segregados vários IEDs dentro de uma estrutura de comunicação restrita e segura, mesmo que os IED's estejam conectados em *switches* diferentes. IEDs que não façam parte desta VLAN tem seus pacotes de dados rejeitados pelo *switch*.

Antes da implementação da VLAN e do tag de prioridade foram observados, durante os ensaios, tempos de *turn-around* (tempo entre uma mensagem GOOSE prioritária de trip percorrer o caminho Relé 1 - Relé 2 - Relé 1) da ordem de 4 a 6 ms. Depois da implementação da VLAN e do tag de prioridade, este tempo caiu para 2 a 4 ms.

As mensagens GOOSE trabalham por exceção, ou seja, somente são transmitidas de um IED para outro quando existe mudança de estado.

No formato GOOSE é possível estabelecer o nível de prioridade das mensagens, acrescentando ao frame da mensagem uma palavra de 4 bytes que representa a VLAN, sendo que 3 bits representam a prioridade da mensagem (varia de 0 a 7, sendo 7 a mais prioritária). Foi adotada a prioridade 4 para todos os IEDs utilizados neste ensaio.

7. Arquitetura das redes de IEDs e das redes de switches ópticos

A arquitetura do sistema implementada nos ensaios realizados foi adequadamente configurada para atender os requisitos especificados para o novo sistema, onde todas as SE possuirão vários *switches*, aos quais todos os IED's instalados nesta SE estarão conectados, através de fibras ópticas, numa configuração distribuída em formato radial (estrela), conforme mostrado na Figura 2.

Os IED's a serem instalados dentro de uma mesma subestação ou interligados através de switches com IED's instalados fisicamente em outra subestação devem ser integrados entre si, compartilhando dados para a execução das funcionalidades anteriormente relacionadas, assim como, num nível superior, com os dos demais circuitos do sistema elétrico da RPBC.

A topologia de arquitetura de rede a ser utilizada para interligação entre os IED's aos switches ópticos é do tipo ESTRELA (RADIAL).

Os IED's de proteção de transformadores, alimentadores de painéis (*feeders*), entradas de painéis e disjuntores de interligação de barras devem possuir duas portas Ethernet com protocolo IEC 61850. Estas duas portas devem ser interligadas em forma RADIAL (em estrela) por meio de cabos de fibra óptica a "Switches" diferentes instalados na subestação. Deve haver o tráfego constante de mensagens de comunicação através das duas portas Ethernet dos IEDs. Em caso de detecção, pelo sistema de automação a ser fornecido e implantado, de falha de comunicação em uma das duas portas, a comunicação deve passar a ser executada, sem interrupção, pela outra porta, e deve ser enviada mensagem de alarme de erro de comunicação do respectivo IED, para o operador do sistema.

A Figura 2 apresenta a arquitetura de rede RADIAL redundante a ser implementada para a interligação de cada IED a switches diferentes.

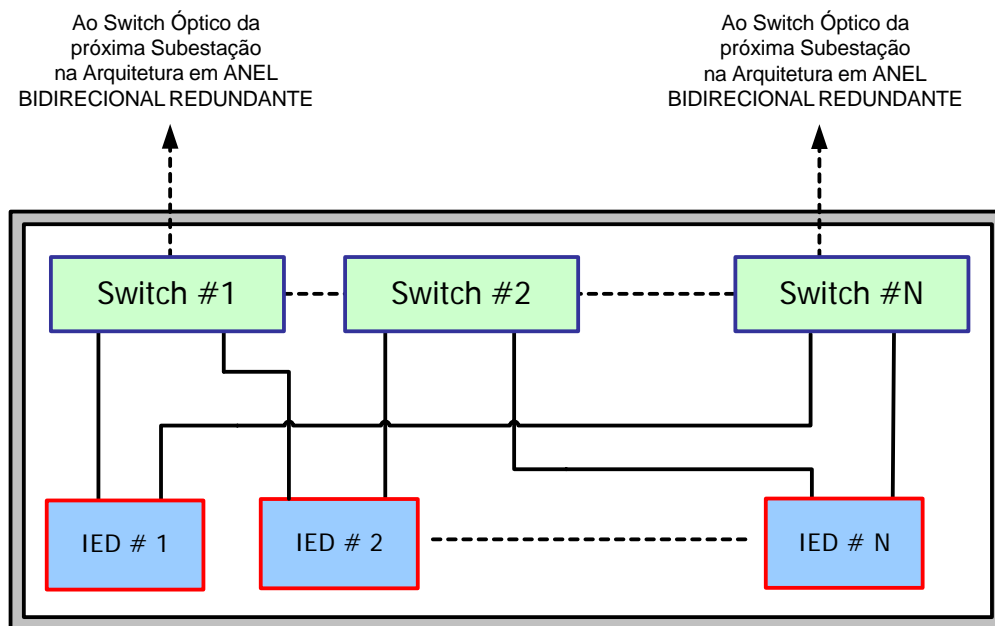


Figura 2 - Arquitetura RADIAL redundante para interligação de cada IED a switches diferentes.

A topologia a ser utilizada para interligação entre os diversos "switches" ópticos a serem instalados nas diferentes subestações é do tipo anel (RING), bidirecional e auto-reconfigurável em caso de interrupção do anel ou ocorrência de falha em alguns dos componentes do sistema, função executada pelo RSTP – Rapid Spanning Tree Protocol.

Esta arquitetura de rede tem a finalidade de proporcionar um grau de redundância de fluxo de dados e um maior nível de segurança à rede. Caso um *link* seja interrompido por perda de um *switch* ou devido a dano a um trecho qualquer dos cabos de fibra óptica, é possível manter todo o sistema operando sem interrupções. Quando a interrupção é detectada, os *switches* se auto reconfiguram em um intervalo de tempo da ordem de 5 ms por *Switch* existente no anel da rede de comunicação de dados.

A interligação entre os diferentes *switches*, incluindo aqueles instalados em diferentes subestações, será realizada, também por fibra óptica, numa configuração conforme mostrado na Figura 3.

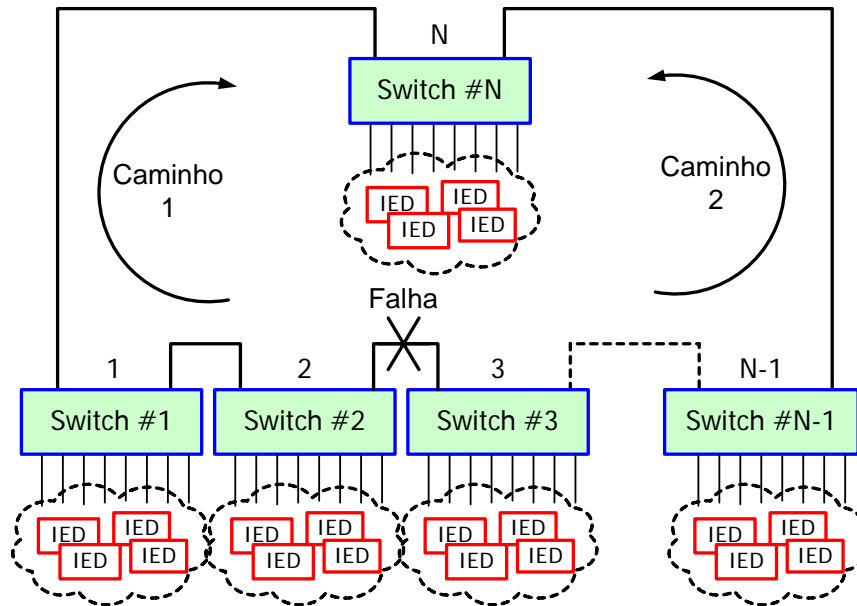


Figura 3 - Arquitetura em ANEL bidirecional redundante para interligação da rede de Switches em sistema Ethernet

8. Medição de tempos de resposta obtidos dos ensaios com e sem saturação de tráfego na rede Ethernet

Foram realizados ensaios comparativos de desempenho de redes de comunicação utilizando o protocolo IEC 61850, com mensagens prioritárias do tipo GOOSE, em duas situações completamente distintas: uma situação com tráfego normal de dados na rede e outra situação com saturação da utilização do tráfego da rede em 100 % de sua capacidade, através da aplicação do programa **IP LOAD** [3].

O *software* IP LOAD foi projetado para enviar uma grande quantidade de pacotes (*frames*) IP (*Internet Protocol*) para um endereço individual (ou *broadcast*), utilizando uma porta TCP (*Transmission Control Protocol*) ou UDP (*User Datagram Protocol*) específica, permitindo a definição, por parte do usuário, do tamanho e da velocidade de transmissão de um pacote de dados a ser enviado. A quantidade máxima de pacotes enviados por segundo também pode ser especificada, e o *software* tentará manter este nível de tráfego, até a máxima capacidade possível da plataforma.

Foram simuladas nestes casos de saturação do tráfego na rede de dados, a propagação de mensagens prioritárias de proteção e intertravamento, tais como *Breaker Failure* (Função **50BF**), Seletividade Lógica (Função **68**) e Transferência de *trip* (Função **94**). De forma a verificar o desempenho de envio de mensagens do tipo GOOSE do padrão IEC 61850, estas mensagens prioritárias, contendo funções de proteção, foram enviadas através da rede de comunicação de dados, simultaneamente com a ocorrência de avalanche contínua de dados. Estas simulações serviram como referência para a verificação da real efetividade de priorização de mensagens através do protocolo IEC 61850.

Foram também realizados ensaios de simulação de lógica, entre IEDs, do tipo paralelismo momentâneo de alimentadores (Função **43**) entre dois disjuntores de entrada e um disjuntor de interligação de um painel de 13.8 kV, com a seleção, pelo operador, via IHM, do disjuntor a ser fechado e do disjuntor a ser aberto, de forma a verificar a comunicação de dados entre IEDs.

Foram também realizados ensaios de simulação de lógica, entre IEDs, do tipo transferência automática de alimentadores, em caso de ausência de tensão (atuação de Função **27**) em um barramento e o respectivo fechamento do disjuntor de interligação de painel de 13.8 kV, em caso de não existência de atuação de proteção por curto circuito.

Estas lógicas de transferência automática de alimentadores e de paralelismo momentâneo, embora não sejam críticas em termos de requisito de tempo, também foram implementadas através de mensagens GOOSE, e serviram de exemplos de viabilidade de implementação de lógicas de automação diretamente nos IEDs, com transferência de dados via rede de comunicação, diferentemente de um sistema de

automação digital baseado em UTRs, onde uma CPU central executava toda a lógica requerida pelo sistema ou oriunda de comandos de IHMs.

Foram realizados ensaios de simulação das funcionalidades do sistema de **descarte seletivo de cargas**, baseado na constante monitoração dos níveis de potência ativa gerada pela UTE e consumida através de cada alimentador das diversas subestações, medidas pelos respectivos IEDs. O descarte seletivo de alimentadores segue uma tabela de prioridades de acordo com a importância operacional de cada subestação, definida pelo usuário.

A simulação de ocorrência de curto circuito no sistema e da atuação das funções de proteção foi realizada através das entradas de corrente dos IEDs, que foram interligadas em série e alimentadas com um sinal de corrente proveniente de uma caixa de calibração de relés existente no laboratório.

A saturação da capacidade de tráfego de dados pela rede, gerado pelo programa IP LOAD, serviu como uma adequada ferramenta para verificação do desempenho de priorização de mensagens do tipo GOOSE pelo protocolo IEC 61850.

A. Ensaio de Seletividade Lógica e Breaker Failure com tráfego de rede normal (sem a utilização do programa IP LOAD)

A função de **Seletividade Lógica (68)** é uma função de proteção aplicada entre IEDs que possuam a função de sobrecorrente interligados em cascata em diferentes níveis de um mesmo circuito, ou seja, onde ocorre a circulação simultânea de correntes de curto-circuito em todos os IEDs.

Através da seletividade lógica pretende-se que todos os IEDs possam utilizar as suas unidades instantâneas de proteção de curto-circuito sem perda da seletividade de atuação, reduzindo assim o tempo de coordenação entre os IEDs e reduzindo o tempo de eliminação de faltas.

A função de seletividade lógica foi implementada nas funções de sobrecorrente instantânea tanto para curto circuito entre fases quanto para fase-terra, com o tempo de seletividade adequado para o processamento das informações dos IEDs envolvidos, enquanto que as funções de sobrecorrente temporizadas dos IEDs continuavam a operar como retaguarda da proteção do IED a jusante.

As mensagens prioritárias de seletividade lógica foram implementadas para serem enviadas através rede de comunicação de IEDs, via mensagens do tipo GOOSE do protocolo IEC 61850.

Essa lógica foi implementada em 4 IEDs interligados em cascata, através de 2 elementos de sobrecorrente em cada IED. Um dos elementos de sobrecorrente foi ajustado sem atraso intencional e foi utilizado como bloqueio, ou seja, assim que o elemento era sensibilizado o relé enviava uma mensagem na rede, bloqueando a atuação do IED à montante. O segundo elemento foi ajustado com uma temporização intencional de 50 ms. Esse elemento efetivamente atua como uma função de sobrecorrente. Caso este elemento seja sensibilizado e o IED não tenha detectado o recebimento de um sinal de bloqueio, ele efetivamente envia um sinal para abertura do respectivo disjuntor. Tanto o elemento 1 quanto o 2 foram parametrizados com valor de *pick-up* de 4 A.

Os 4 IEDs utilizados para esse ensaio foram ligados em série com a caixa calibração de relés, de forma que a mesma corrente foi passada simultaneamente por todos os IED configurados para a função de seletividade lógica. No início do ensaio a caixa foi programada para injetar 1 A (0.25 pu) de corrente nos IEDs. Para a simulação da ocorrência de curto circuito, esse valor foi aumentado para 12 A (aproximadamente 3 pu do valor de *pick-up*). Todos os IEDs tiveram os elementos 2 sensibilizados, porém apenas o IED mais a jusante atuou, pois os demais receberam mensagens de bloqueio e não enviaram sinal de desligamento para o respectivo disjuntor. A atuação de um IED foi configurada para desligar a caixa de calibração de relés.

Os resultados obtidos destes ensaios demonstraram a viabilidade e a adequação de operação desta lógica de proteção de seletividade lógica baseada em IEDs, interligados em rede Ethernet, utilizando protocolo IEC 61850, inclusive com mensagens priorizadas, através da função GOOSE.

A função **falha de disjuntor (50 BF)** foi configurada para que o IED envie uma mensagem ao IED à montante, através de função GOOSE, quando comandar o *trip* do disjuntor e este não abrir, devido a uma possível falha eletromecânica.

Esta função 50 BF faz com que o IED continue a supervisionar a corrente no circuito mesmo após o comando de *trip* por sobrecorrente. Se a corrente continuar acima de um determinado valor ajustado,

decorrido também um determinado tempo ajustável após o *trip*, o IED envia uma mensagem do tipo GOOSE, que comanda a abertura de um disjuntor à montante.

Essa lógica foi implementada também nos 4 IEDs em interligados em cascata. O sinal de bloqueio pela função 50 BF foi parametrizado para possuir um *delay* de 100 ms. Decorrido este tempo, caso a função de sobrecorrente ainda estivesse atuada, o IED envia um sinal de *trip* para a abertura para do correspondente disjuntor à montante. Os 4 IEDs utilizados para esse ensaio foram ligados em série com a caixa de calibração de relés. Cada IED teve um contato de saída configurado para enviar um sinal de parada para uma entrada independente da caixa de injeção de corrente. O ensaio foi realizado retirando-se o sinal do IED mais a jusante, de maneira que o IED atuava, porém não enviava o sinal de parada para a caixa, a qual continuava injetando corrente nos IEDs, simulando uma condição de falha na abertura do disjuntor mais a jusante, com conseqüente atuação do segundo IED da cascata. Esse ensaio foi realizado repetitivamente simulando condições extremas de falha simultânea de até 3 disjuntores em cascata, simulando uma contingência tripla.

Os resultados obtidos destes ensaios demonstraram a viabilidade e a adequação de operação desta lógica de proteção de 50 BF baseada em IEDs, interligados em rede Ethernet, utilizando protocolo IEC 61850, inclusive com mensagens prioritizadas, através da função GOOSE.

De forma a documentar adequadamente os tempos medidos de atuação das funções e dos respectivos IEDs, foram capturadas telas do programa de monitoração e controle, apresentando os tempos registrados para o envio das mensagens prioritárias entre IEDs, através da função GOOSE/IEC 61850, quando da ocorrência de eventos de faltas, que deram origem à partida da função de seletividade lógica, bem como da ocorrência de falha de abertura de disjuntor.

No ensaio de Seletividade Lógica entre um IED de um disjuntor de saída do painel de 13.8 kV da SE C-14 e o IED do disjuntor de entrada deste painel, com tráfego normal da rede de comunicação (sem aplicação do programa IP LOAD), o tempo registrado pelo programa de monitoração, para envio do sinal de bloqueio foi de **3.1 ms**.

B. Ensaio de Seletividade Lógica e de Breaker Failure com saturação de 100% da capacidade de tráfego da rede (com a utilização do programa IP LOAD)

O *software* "IP LOAD" foi configurado para enviar continuamente 4.000 pacotes (*frames*) por segundo de 200 bytes cada frame, para o IP 192.168.1.152 (endereço do IED do alimentador do painel de 13.8 kV da SE C-14). De acordo com estes valores de configuração, o total de tráfego de dados na rede Ethernet para o endereço IP de destino configurado é de **6.4 MBit/s**, equivalente a 4.000 pacotes/segundo x 200 bytes x 8 Bit/byte, em uma rede de 10 MBit/s.

Os *switches*, de 10 MBit/s, foram configurados na forma **Full Duplex**, dividindo pela metade a sua capacidade de banda de tráfego entre informações recebidas e informações enviadas. Dessa forma, o carregamento da rede no IED do IP designado atingiu 100% de sua capacidade, conforme mostrado no gráfico de carregamento da rede obtido do sistema Windows XP[®], uma vez que o volume total de pacotes enviados, de 6.4 MBit/s excedeu a capacidade da banda de recebimento que é de 5 MBit/s na configuração *Full Duplex*.

Foi verificada, em todos os casos de saturação da rede, que a taxa de colisão foi de 0 (zero) ocorrências, neste modo *Full-Duplex*. Em uma etapa intermediária dos ensaios realizados, utilizando a configuração *Half-Duplex*, foi verificada a ocorrência de elevada taxa de colisões, o que implicaria em problemas de tráfego caso fosse utilizada esta configuração *Half-Duplex*, a qual foi descartada da configuração final, sendo adotada a configuração *Full-Duplex*.

A Figura 4 apresenta uma das janelas de ajuste do programa IP LOAD, com valores de configuração do tráfego desejado e do endereço de destino dos pacotes a serem enviados.

C. Ensaio de Paralelismo Momentâneo de Alimentadores (Função 43), com tráfego normal (sem a utilização do programa IP LOAD).

A lógica de automatismo e intertravamento para o paralelismo momentâneo de alimentadores efetuam a seleção do disjuntor a ser fechado e o comando automático do disjuntor a ser aberto, após o fechamento do terceiro disjuntor. Este intertravamento tem por objetivo evitar o paralelismo permanente de dois alimentadores em um mesmo painel, o que acarretaria uma condição indesejada de capacidade de nível de curto circuito excedido, para o qual o painel não foi especificado.

A lógica para esta função foi implementada no IED de interligação de barras (TIE) de um painel com dois alimentadores. A lógica implementada inclui a seleção pelo usuário do sistema elétrico, através de IHM, do modo de operação LOCAL (operação manual, efetuada no teclado do IED, pelo operador de campo) ou operação REMOTA (efetuada pela IHM do sistema de supervisão, pelo operador do Centro de Operações).

Caso o sistema de operação seja selecionado para o modo *remoto*, o comando pode ser efetuado apenas pela IHM do sistema, bloqueando nesta condição, qualquer comando manual de fechamento dos disjuntores.

Caso o sistema de operação seja selecionado para comando *local*, o comando passa a ser possível apenas através do teclado do painel frontal do IED.

A lógica implementada verifica ainda a consistência do comando efetuado, verificando também se a opção selecionada é válida, em função dos estados atuais dos disjuntores selecionados. Caso a opção selecionada seja válida, o botão de confirmação do comando torna-se operacional, mudando da cor vermelha para a cor verde. Neste momento o operador pode realizar o comando de fechamento do disjuntor selecionado, sendo a lógica implementada responsável pela posterior e imediata abertura do respectivo disjuntor selecionado.

A lógica implementada para esta função de automatismo através de IED possui aproximadamente 250 passos de programação. A sua implementação e a sua adequada funcionalidade, demonstrada nos ensaios realizados, serviram também para evidenciar a viabilidade de implementação de funções lógicas diretamente nos IEDs, tornando a "inteligência" do sistema realmente distribuída, dispensando a utilização de UTRs.

A Figura 6 apresenta a condição inicial e final do ensaio, onde um painel é representado inicialmente com o disjuntor da entrada A **Fechado** e o disjuntor da entrada B **Aberto**. Nesta condição, foi selecionado o comando de fechamento do disjuntor da entrada B e selecionada a abertura do disjuntor da entrada "A". A condição final do ensaio deste automatismo, onde o disjuntor da entrada A encontra-se **Aberto** e o disjuntor da entrada B encontra-se **Fechado**. Para se chegar nesta situação final, a lógica implementada efetuou o fechamento momentâneo do disjuntor da entrada B e depois efetuou imediatamente na seqüência, a abertura do disjuntor da entrada A.

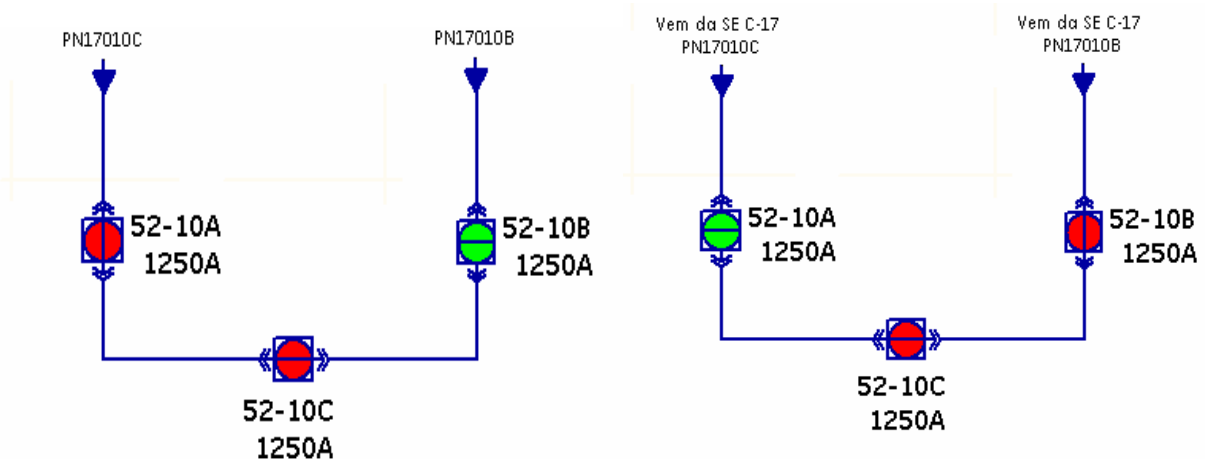


Figura 6 - Condição inicial do ensaio de automatismo de paralelismo momentâneo de alimentadores.

O tempo registrado pelo programa de monitoração, para o envio do sinal de comando para executar a lógica de paralelismo momentâneo de alimentadores, a partir do relé onde a lógica está implementada para o relé de abertura do disjuntor foi de **0.935 ms**, conforme registrado pelo programa de monitoração.

D. Ensaio de Paralelismo Momentâneo de Alimentadores (Função 43) com a utilização do programa IP LOAD

Para este ensaio, o IP Load foi programado para enviar os pacotes para o relé do disjuntor do TIE no qual estão carregadas todas as lógicas do Paralelismo Momentâneo.

O tempo registrado pelo programa de monitoração, para envio do sinal, desde relé onde a lógica está implementada para o relé de abertura do disjuntor foi de **1.230 ms**, representando uma degradação de apenas **0.295 ms** em relação ao tempo registrado para a mesma lógica em condição de tráfego normal da rede (**0.935 ms**).

E. Transferência automática de alimentadores por Subtensão (Função 27)

O sistema elétrico das subestações opera normalmente com os centros de cargas de média e baixa tensão com um dos três disjuntores principais aberto. A transferência automática consiste em fechar automaticamente o disjuntor que se encontrar aberto, quando ocorrer um evento de falta de tensão um dos alimentadores.

Com este fechamento automático, depois de decorrido o tempo necessário para o decaimento da tensão remanescente, é restabelecida a tensão naquele lado da barra sem tensão, permitindo a re-partida das cargas alimentadas por esta barra.

Na lógica implementada para este ensaio, havendo queda de tensão de 80 % durante 2 s, o IED do lado do alimentador com subtensão envia um sinal de abertura para o respectivo disjuntor e envia uma mensagem prioritária para o IED do disjuntor de interligação.

A lógica verifica qual disjuntor de entrada deve ser fechado, verifica também se o disjuntor cujo IED atuou por subtensão realmente abriu, se o terceiro disjuntor está fechado, se a chave virtual 43 CS, configurada na tela da IHM (Chave de seleção do modo de operação Local/Remoto), está em "Remoto" e se não existe sinal do sistema supervisor bloqueando a transferência. O retorno do sistema na condição de operação normal é feito manualmente, local ou remotamente.

Para simular a função de transferência automática de alimentadores, devido a uma subtensão em uma das barras, foi utilizada a função de subtensão dos IEDs das entradas. Essa função tem uma parametrização de mínima tensão, a qual é parametrizada para atuar em 0,1 pu, sendo que a medição de 0.0 pu não provoca a operação da função 27.

Uma vez que, no ensaio, a tensão aplicada ao IED foi igual a zero, a função de subtensão não se encontrava atuada. No momento da realização do ensaio desta lógica, a parametrização de mínima tensão do IED foi reconfigurada de 0.1 pu para 0.0 pu, provocando a atuação da função 27, e provocando a transferência da alimentação da barra onde foi acusada a subtensão, com a abertura do disjuntor de entrada da barra A e fechamento do disjuntor do TIE.

Esta função foi também ensaiada com a saturação do tráfego da rede, pelo programa *IP LOAD* no endereço IP do IED da entrada A, onde foi carregada esta lógica de transferência automática de alimentadores.

A Figura 7 apresenta a condição **inicial** do ensaio (antes da ocorrência da subtensão), encontrando-se o painel com as duas entradas energizadas (disjuntores das entradas A e B **fechados**) e com o disjuntor de interligação (TIE) **aberto**.

Novo sistema digital de proteção e automação para sistemas elétricos de refinarias de petróleo

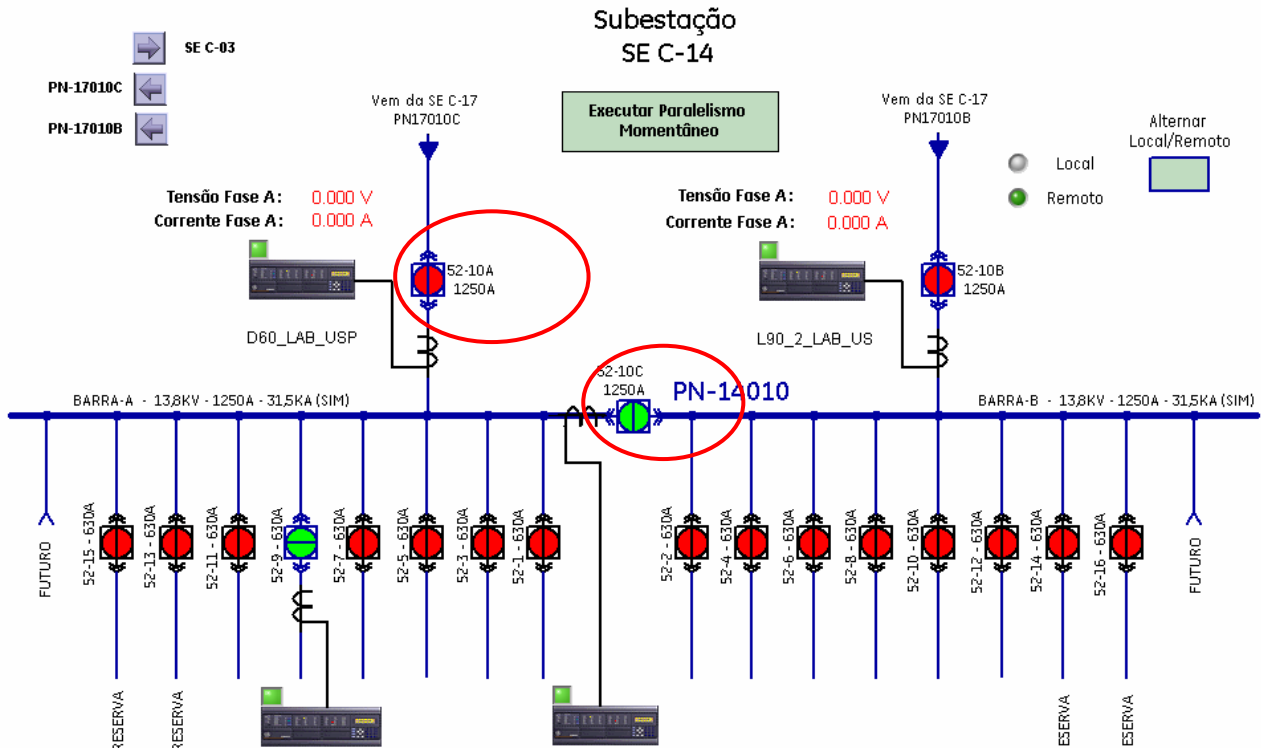


Figura 7 - Condição inicial do ensaio de automatismo de transferência automática de alimentadores.

A Figura 8 apresenta a condição **final** do ensaio (após a ocorrência da subtensão e da transferência automática), com o disjuntor da entrada A **aberto** (em função de subtensão na barra A) e disjuntor de interligação **fechado** (devido à lógica de transferência automática de alimentadores por subtensão).

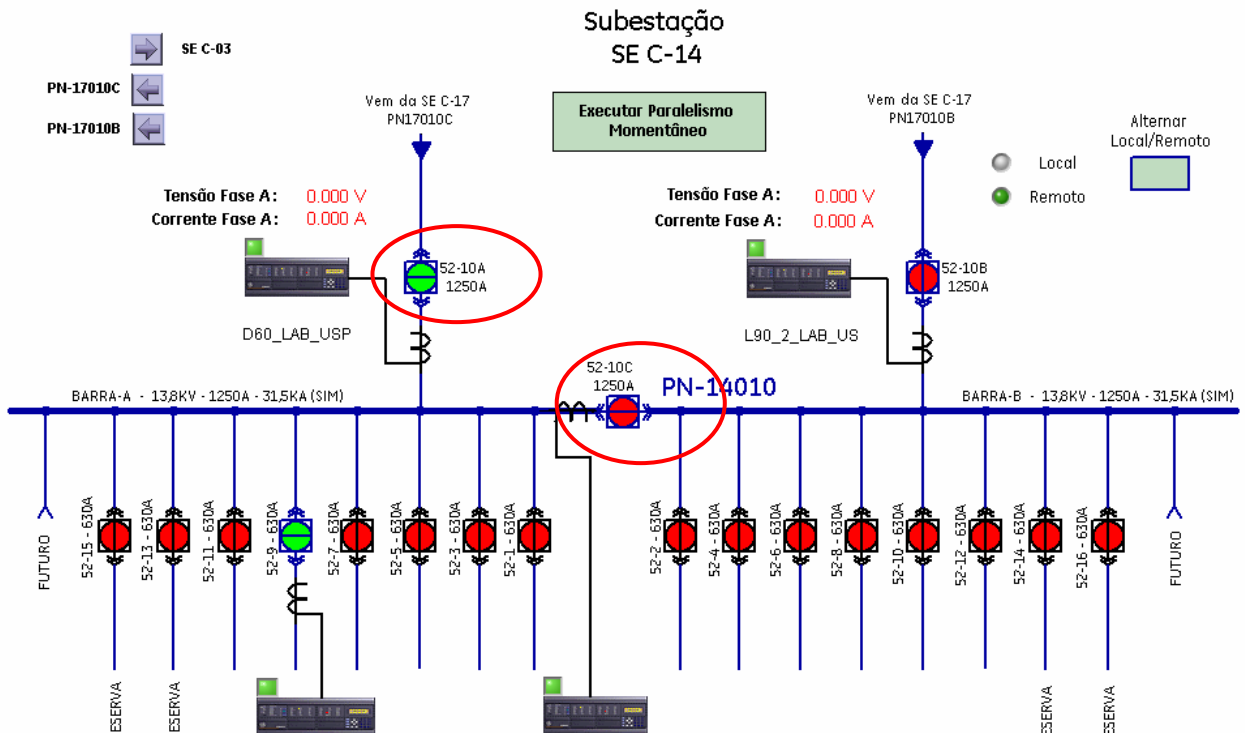


Figura 8 - Condição final do ensaio de automatismo de transferência automática de alimentadores.

F. Tabela comparativa de tempos de atuação de mensagens GOOSE com tráfego normal de rede e com saturação de tráfego de 100 % da capacidade da rede.

É apresentado na tabela a seguir um resumo das medições de tempo realizadas para a execução das funções de proteção de paralelismo momentâneo (ANSI 43) e de seletividade lógica (ANSI 68) e breaker-failure (ANSI 50 BF) em duas condições distintas: com tráfego normal da rede de dados e com saturação de 100% de capacidade de tráfego.

Função de Proteção implementada nos IEDs	Tempo de atuação com tráfego de rede normal	Tempo de atuação com saturação do tráfego de 100 % da capacidade da rede	Degradação de tempo devido à saturação do tráfego da rede
Paralelismo Momentâneo de alimentadores (43)	0.935 ms	1.230 ms	0.295 ms
Seletividade Lógica (68) e Breaker Failure (50 BF)	3.10 ms	4.00 ms	0.90 ms

Os baixíssimos tempos de degradação das funções de proteção, da ordem de 0,3 a 0,9 milisegundos, mesmo em casos críticos de total saturação de capacidade de tráfego da rede servem para demonstrar a efetividade de priorização das mensagens de proteção do tipo GOOSE, atendendo os requisitos apresentados na norma IEC 61850.

A verificação prática destes baixos tempos de degradação de tempo serve como base e orientação no sentido da viabilidade de utilização de novos sistemas digitais baseado no envio de funções de proteção através de redes de comunicação do tipo Ethernet, utilizando IED's e Switches ópticos gerenciáveis, com protocolo IEC 61850.

Esta nova concepção representa uma grande evolução em relação aos circuitos atuais de proteção, os quais normalmente são realizados através de ligações físicas entre relés de proteção através de fios de cobre.

G. Simulação de lógica de "Load Shedding" - Descarte Seletivo de Cargas

O descarte Seletivo de Cargas tem como finalidade equilibrar o sistema elétrico após a perda de uma fonte de geração de energia, de formar a tornar o consumo de energia utilizado pela totalidade das cargas remanescentes, compatível com a potência das fontes de geração de energia remanescentes.

A lógica de descarte seletivo de cargas foi implementada, de acordo com o especificado, para ser realizada no nível dos alimentadores de 13,8 kV.

De forma a garantir o rápido re-equilíbrio das fontes de geração e a estabilidade do sistema elétrico o descarte de cargas deve operar entre 200 ms a 300 ms. O desligamento deve envolver o menor número de cargas possível.

Para simular a função de descarte de cargas, requerido do sistema de proteção e automação a ser implantado na Refinaria Presidente Bernardes, foi implementada uma lógica de descarte seletivo nos IED's. A execução desta lógica depende de informações da disponibilidade de energia a partir da geração da UTE, a ser obtida do sistema de automação a ser implantado naquela usina de geração, e das medições de potência realizada pelos IEDs dos diversos circuitos alimentadores em 13.8 kV das subestações C-17, C-14 e C-3.

As informações de balanço de energia de geração disponível e energia consumida será fornecida para a rede de IEDs através de um servidor dedicado, a ser implementado para essa finalidade.

Para a execução deste ensaio foram implementados 4 níveis distintos de disponibilidade de potência na geração da Unidade Termo Elétrica, tendo sido implementadas lógicas de descarte seletivo quando da ocorrência de níveis de potência de 50 MW (situação normal), 30 MW (primeiro estágio de descarte), 20 MW (segundo estágio de descarte) e 10 MW (terceiro estágio de descarte).

A Figura 9 apresenta o sistema elétrico na condição de ocorrência do terceiro estágio de prioridade com descarte de quatro níveis de disjuntores, de acordo com níveis de prioridades pré-definidos e em função da disponibilidade de geração da Unidade Termo Elétrica.

Os valores verificados e medidos na prática para tempos de transmissão de mensagens de *trip*, da ordem de **3 ms**, serviram para confirmar os dados teóricos de desempenho indicados na normalização IEC 61850.

A comparação de degradação de tempo de envio destas mesmas mensagens em situações de tráfego normal e situações extremas de tráfego, com valores de degradação de desempenho da ordem de **1 ms**, serviram para atestar com valores práticos a priorização de mensagens.

10. Certificação de terceira parte de atendimento dos desempenhos requeridos na IEC 61850

O desempenho dos IED's a serem adquiridos deve ser comprovado através de certificados de terceira parte, baseados em relatórios de ensaios realizados por laboratório independente, com sistema de garantia da qualidade baseado nas Normas ISO 9000 e certificado pelo UCA Users Group, tal como o laboratório holandês KEMA [4], reconhecido mundialmente como capacitado para ensaios sobre este protocolo de comunicação industrial elétrico.

Devem ser atestados, nos certificados de conformidade a serem fornecidos, que os IED's foram ensaiados de acordo com a Norma IEC 61850 - 10 - *Networks and Systems in Substations - Part 10: Conformance Testing*, e que não apresentam não conformidades em relação às partes 6, 7-1, 7-2, 7-3, 8-1 da família de Normas IEC 61850.

A posse de tais certificados deve ser requisito para a qualificação de fabricantes e fornecedores de relés de proteção e sistemas de proteção e automação elétricas baseados nos requisitos das normas IEC 61850.

11. CONCLUSÕES

Foram alcançados, através da realização destes ensaios pioneiros, os principais objetivos pretendidos, de verificação da viabilidade de implementação de um sistema digital de proteção e automação, aplicado a um sistema industrial de grande porte, baseado em funções de proteção implementadas através de mensagens prioritárias do tipo GOSSSE, conforme protocolo IEC 61850.

Foram verificadas também as viabilidades de implementação das funções de proteção, automatismo e intertravamentos normalmente necessários em um complexo sistema elétrico industrial, totalmente baseadas em IEDs, em um arquitetura baseada em rede Ethernet, realmente distribuída, com as lógicas implementadas diretamente nos IEDs, sem necessidade de UTRs ou concentradores de dispositivos.

Com base nos resultados obtidos, verifica-se que podem ser otimizados os tempos de atuação e de seletividade de proteção entre diferentes níveis de proteção e subestações localizadas fisicamente em locais diferentes. Podem ser implementados, com melhoria nos índices de desempenho do sistema de proteção, funções de intertravamentos e proteção enviadas através de rede de dados, ao invés do sistema clássico de implementação de circuitos físicos *hardwired*, através de circuitos de comando construídos com fios de cobre.

Com base nas funções de proteção e comunicação disponíveis nas recentes tecnologias de relés de proteção microprocessados, é possível a implementação de tempos de seletividade mais baixos, baseados em esquemas de seletividade lógica e de *Breaker Failure*, que podem levar a uma redução dos requisitos de limites térmicos de cabos e painéis elétricos.

A realização destes ensaios serve como subsídios de informações e dados para uma melhor especificação de novos sistemas de proteção e automação de sistemas elétricos de potência, baseado em IEDs interligados em redes Ethernet, com arquitetura baseada em Switches Ópticos, e com comunicação de dados baseada nos requisitos do protocolo IEC 61850.

Como resultado dos ensaios realizados, foram também verificadas as vantagens existentes entre o desempenho e facilidades de configuração de um sistema de proteção e automação baseado em lógicas distribuídas em IEDs, com protocolo de comunicação aberto, baseado na normalização internacional IEC 61850, comparativamente com um sistema de automação baseado em UTRs, com protocolo de comunicação fechado, proprietário do fabricante do sistema.

A disponibilização da base de dados para proteção e automação em um sistema OPC - Open Connectivity via open Standards [5] possibilita o interfaceamento e operação de diferentes sistemas,

tornando possível a integração de sistemas de automação elétrica existentes, mesmo operando em protocolos proprietários, com novos sistemas, baseados em protocolo aberto, padrão IEC 61850.

12. Agradecimentos

Participaram do planejamento, especificação, implementação e realização destes trabalhos na Escola Politécnica da USP os seguintes profissionais:

- Engenheiro Roberval Bulgarelli - PETROBRAS / RPBC - Refinaria Presidente Bernardes de Cubatão
- Professor Dr. Eduardo César Senger – Escola Politécnica da USP
- Engenheiro Pesquisador Francisco Antônio Reis Filho - Escola Politécnica da USP
- Engenheiro Paulo Egídio Zerbinatti - GE Supply do Brasil
- Engenheiro Adenilson Dias dos Santos - GE Supply do Brasil
- Engenheiro Enrico Augusto Viceconti - GE Supply do Brasil

Os responsáveis pela elaboração destes ensaios e verificação de desempenho da rede de comunicação de dados utilizando IEDs e protocolo IEC 61850 agradecem pelo apoio recebido da Escola Politécnica da USP - Departamento de Energia e Automação Elétrica, da PETROBRAS - Refinaria Presidente Bernardes de Cubatão (RPBC) e da GE Supply do Brasil, indispensáveis para a viabilização e realização deste trabalho.

13. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] IEC 61850, Communication networks and systems in substations, International Electrotechnical Commission, Geneva, Switzerland, 2005.
- [2] UCA, Utility Communications Architecture, <http://sharepoint.ucausersgroup.org/default.aspx>
- [3] BTTSOFTWARE, Programa IP LOAD, Version 1.2, 1999. Disponível *Freeware* em <http://www.bttsoftware.co.uk/ipload.html>.
- [4] KEMA – Keuring van Elektrotechnische Materialen (Companhia de Ensaios de Materiais Elétricos) http://www.kema.com/consulting_services/transmission_and_distribution/electricity_T_and_D_system_design_and_components/protection_control_substation_automation/
- [5] OPC - Open Connectivity via open standards <http://www.opcfoundation.org/Default.aspx>

CURRICULUM VITAE ROBERVAL BULGARELLI

Engenheiro eletricitista graduado em 1985. Mestre em Engenharia Elétrica - Proteção de Sistemas Elétricos de Potência pela Escola Politécnica da USP. Consultor Técnico e engenheiro de equipamentos sênior da PETROBRAS. Atua em projetos e implantação de Empreendimentos de sistemas elétricos industriais desde 1988, nas áreas de sistemas de proteção e automação elétrica e equipamentos e instalações em atmosferas explosivas, para plantas de petróleo e petroquímica. Membro da Subcomissão de Normalização Técnica da PETROBRAS, na área de eletricidade. Coordenador do Subcomitê SC-31 do COBEI - Equipamentos e Instalações em Atmosferas Explosivas. Representante do Brasil no Technical Committee TC-31 - Equipment for Explosive Atmospheres da IEC. Coordenador do Subcomitê SC-41 do COBEI – Relés de Medição e equipamentos de proteção. Um dos autores do livro "Instrumentação Industrial", publicado pelo IBP – Instituto Brasileiro do Petróleo e Gás, colaborando no capítulo "Atmosferas Explosivas". Trabalha atualmente na Gerência de Engenharia da Refinaria Presidente Bernardes de Cubatão – RPBC. E-mail: bulgarelli@petrobras.com.br

