

GRUPO DE ESTUDO DE PROTEÇÃO, MEDIÇÃO, CONTROLE E AUTOMAÇÃO EM SISTEMAS DE POTÊNCIA - GPC

A EXPERIÊNCIA NA APLICAÇÃO DAS DSAS COM BARRAMENTO DE PROCESSOS EM SUBESTAÇÕES DE TRANSMISSÃO E BENEFÍCIOS AO MODELO ATUAL

**RUI MIGUEL MARTINHO DIAS JORGE(1); JOÃO VÍTOR VIEIRA PERES(1); NATHALIA ROBERTA FERREIRA DE MIRANDA(1); FRANCISCO M PIRES NETO
POWER SOLUTIONS BRASIL SISTEMAS DE AUTOMACAO E POTENCIA LTDA(1)**

RESUMO

Com o desenvolvimento de sistemas de automação de subestação digital, novas arquiteturas podem ser concebidas, nomeadamente com a digitalização do barramento de processo. Daí surge a necessidade de implementar um novo tipo de cadeia de aquisição analógica, capaz de lidar com os desafios associados à resiliência do sistema a falhas e à dependência de um sistema de sincronização muito preciso. Neste artigo, uma nova abordagem é apresentada, suportada em esquemas inovadores para superar os desafios anteriores. As estratégias propostas são amplamente testadas nos piores cenários, comparando com a solução SAS convencional e foram implementadas em instalações reais em operação.

PALAVRAS-CHAVE

Subestação Digital, Redundância, Sincronização horária, Recuperação Automática da Operação, *Process Bus*

1.0 INTRODUÇÃO

Os custos de investimento e operação ao longo de todo o ciclo de vida de um sistema de automação podem ser reduzidos com a concepção e desenvolvimento de novas arquiteturas para subestação digital (DSAS). Adicionalmente, estas novas arquiteturas trazem vários benefícios, incluindo desempenho funcional, confiabilidade, simplicidade, flexibilidade e segurança.

Um dos pontos-chave desta nova abordagem aos sistemas de automação de subestações é a digitalização do barramento de processo, da qual surge a necessidade de implementar um novo tipo de cadeia de aquisição analógica, em IEDs de painel de proteção e controle, capaz de lidar com os desafios num ambiente DSAS. Há dois desafios há superar: a resiliência do sistema a falhas, com recuperação automática da operação; a dependência de um sistema de sincronização muito preciso para execução das funções PAC. Neste artigo, tal cadeia de aquisição analógica será apresentada, bem como esquemas inovadores para aumentar a resiliência a falhas nas comunicações e na sincronização horária.

Para garantir total versatilidade em qualquer tipo de arquitetura de subestação, quatro diferentes fontes de informação são consideradas: informação clássica obtida a fio de transformadores de corrente e tensão convencionais; informação digital associada a sinais analógicos de extremos remotos das linhas de transmissão, obtidos de um canal dedicado baseado em IEEE C37.94 [3]; informações digitais provenientes do barramento de processo com base nas normas IEC 61850 9-2 [1] e IEC 61869-9 [2] (SV); informação de fasores digitalizados PMU com base na norma IEEE/IEC 60255-118-1 [6]. Todas as quatro fontes de informação podem funcionar simultaneamente, garantindo a disponibilidade de informações analógicas coordenadas para algoritmos de funções PAC em qualquer tipo de aplicação.

Os autores discutirão em detalhe os elementos usados para a subscrição de SV, particularmente o módulo de gestão de redundância de várias MU e o módulo de recuperação automática em caso de falha. Ambos os módulos são projetados para obter uma confiabilidade e disponibilidade aprimoradas do sistema DSAS.

Por outro lado, existe a necessidade da existência de uma fonte de sincronismo muito precisa, pois a DSAS é dependente dessa condição e faz com que possa haver uma maior probabilidade de indisponibilidade do sistema de proteção e controle em caso de falha na recepção do sinal GPS ou, para evitar esse risco, necessidade de redundância de relógios com respectivo aumento de custo total da solução.

Neste artigo, são apresentados resultados dos testes efetuados à cadeia de aquisição analógica proposta, em um IED de nível de painel e os resultados são apresentados incluindo o tempo de eliminação de defeitos para o DSAS, quando comparadas com a solução SAS convencional. As estratégias propostas são amplamente testadas nos piores cenários.

Todas as abordagens apresentadas neste artigo correspondem a implementações em sistemas PAC em instalações reais em operação.

2.0 SOLUÇÕES CONVENCIONAL E DIGITAL PARA AUTOMAÇÃO DE SUBESTAÇÕES DE TRANSMISSÃO

Uma solução típica para automação de subestações de transmissão inclui, para cada painel, vários IEDs desempenhando funções de proteção e controle. Na maior parte das situações, são usados dois IEDs de proteção de forma a garantir a redundância da função proteção e um IED adicional para automação e controle.

Os IEDs encontram-se tipicamente ligados numa rede de área local (LAN) que pode ter diversas configurações, consoante o nível de redundância e disponibilidade desejado. Arquiteturas em anel são usuais, nomeadamente as baseadas em topologias RSTP, que garantem alguma recuperação rápida da rede, mas não instantânea, em caso de perda de uma das ligações. A norma internacional IEC 61850 é atualmente comumente utilizada para garantir a interoperabilidade no sistema. Já a ligação ao processo é ainda hoje suportada na maior parte das instalações em ligações cabladas.

Nas arquiteturas DSAS, o sistema passa a ser composto por duas redes de comunicações, normalmente isoladas por questões de fiabilidade e de segregação de tráfego, o *Station Bus* (Barramento de SE), e o *Process Bus* (Barramento de Processo).

O *Station Bus* interliga todos os IEDs da subestação, o SCADA Gateway e o HMI. Nele circulam as informações necessárias para as funções de automatismos executadas nos IEDs de cada um dos painéis (encravamentos e informações sobre grandezas analógicas, estados de órgãos, etc.), as informações sobre valores de grandezas analógicas, estados de órgãos e outras sinalizações que devem ser reportadas para o SCADA e visualizadas no HMI e ordens de atuação sobre órgãos ou funções provenientes do SCADA ou do HMI.

O *Process Bus* é utilizado para transmitir os sinais amostrados das tensões e correntes disponibilizadas por NCITs ou por *merging units* (através de mensagens do tipo *Sampled Values* ou SV) e as ordens de disparo de órgãos de corte (através de mensagens do tipo GOOSE), substituindo assim as ligações cabladas nas arquiteturas convencionais. A dependência das funções de proteção da rede de comunicação obriga a que a arquitetura física desta última tenha níveis de redundância e disponibilidade superiores. Para tal, arquiteturas do tipo PRP ou HSR são comumente usadas na rede de processo por garantirem um tempo de recuperação nulo em caso de falha de algum componente ou perda de alguma mensagem crítica.

Esta nova arquitetura DSAS, conjuntamente com a filosofia de dispositivos lógicos preconizada na norma IEC 61850 permite considerar novas arquiteturas lógicas do sistema, em que a distribuição das funções PAC pelos vários IEDs e níveis da hierarquia de controle pode ser bastante distinta das soluções convencionais. Por exemplo: eliminando o IED de controle e distribuindo as suas funções de forma redundante pelos dois IEDs de proteção; considerando *backup* local realizado por funções ao nível da *merging unit*; ou prevendo evolução para a virtualização futura de algumas funções a serem executadas numa infraestrutura centralizada a toda a instalação.

Uma alternativa à utilização direta de SV em certas funções, que garante uma menor ocupação da largura de banda disponível, é a distribuição no barramento de processo de medidas fasoriais sincronizadas, provenientes de funções PMU. Uma das aplicações possíveis é a transmissão das medidas das tensões das barras, que podem ser distribuídas por meio de comunicações horizontais entre os vários IEDs de painel, para utilização em automatismos como os de verificação de sincronismo e transferência de barra, ou por meio de comunicações verticais, para efeitos de medida ou algoritmos centralizados.

A utilização combinada de sinais amostrados e medidas fasoriais sincronizadas permite uma flexibilidade muito grande na seleção da informação mais adequada à implementação de cada função do sistema.

3.0 DIGITALIZAÇÃO DA CADEIA DE AQUISIÇÃO ANALÓGICA PARA IED DE PAINEL

De modo a ser possível aplicar na prática os conceitos de digitalização do barramento de processo, alavancando as vantagens das novas arquiteturas de subestação, há uma área central à capacitação dos sistemas atuais de automação para lidar com o ambiente de uma DSAS – a cadeia de aquisição analógica dos IEDs de painel.

É fundamental garantir a capacidade dos IEDs de painel de adquirirem sinais digitais analógicos das diversas fontes possíveis existentes numa subestação digital, o que inclui:

1. Aquisição de *Sampled Values* (SV) do barramento de processo digitalizado, baseados na norma IEC 61850 9-2 [1] e IEC 61869-9 [2];
2. Aquisição de informação analógica fasorial PMU do barramento de processo ou de *station* para comunicação horizontal ou vertical, baseado na norma IEEE/IEC 60255-118-1 [6];
3. Aquisição analógica clássica através de ligação a cobre e ADCs dedicados nos IEDs de painel;
4. Aquisição a partir de canal dedicado para comunicação inter-subestação baseado na norma IEEE C37.94 [3].

Todas estas fontes de informação analógica devem alimentar em paralelo os algoritmos PAC nos IEDs de painel, permitindo uma decisão robusta e transparente da origem das amostras.

Para além das novas capacidades de aquisição analógica (1.) SV e (2.) PMU, que efetivamente possibilitam atingir um novo patamar de aplicação e versatilidade arquitetural no sistema de automação, a capacidade de retro compatibilidade com sistemas clássicos (3.) a fio e (4.) inter-subestações continua a ser relevante. Esta importância é justificada pela capacidade de expansão ou atualização de sistemas de automação existentes, onde só alguns painéis ou só alguns níveis de tensão veem o seu barramento de processo digitalizado, e devem coexistir com o restante sistema com barramento de processo clássico. Para além disso, em esquemas de proteção onde é central a comunicação inter-subestação (como a proteção diferencial de linha), apesar da oportunidade em DSAS de utilizar

Routable Sampled Values (R-SV), vislumbra-se a necessidade de upgrade faseado das subestações, mantendo o esquema de proteção em funcionamento; logo é necessário suportar tecnologia clássica de comunicação dedicada entre subestações digitais e não digitais. Uma cadeia de aquisição analógica com estas capacidades é apresentada na Figura 1, e as suas componentes fundamentais são discutidas em seguida.

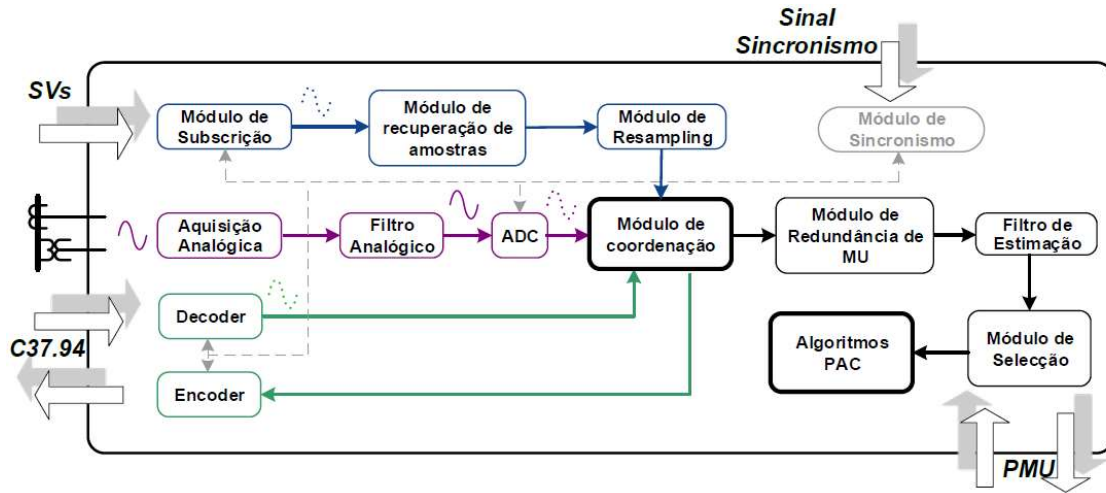


Figura 1 - Cadeia de aquisição analógica para IEDs de painel

3.1 Módulo de sincronismo de alta precisão

Da aquisição de informação analógica distribuída, utilizada em paralelo e de forma transparente da sua origem pelas funções PAC, nasce naturalmente a necessidade do sincronismo de alta precisão. De modo a garantir a precisão dos sinais, mesmo em aquisição distribuída, é necessário garantir a coerência temporal da informação, o que implica precisão no momento de aquisição e datação das amostras maior que 1µs (correspondente a um erro máximo de fase de 0.18° para fasores a 50hz). Para este efeito, a cadeia de aquisição é dotada da capacidade de coordenar informação analógica com estes requisitos, suportando protocolos de sincronismo compatíveis com este nível de performance – como: *Precision time Protocol* (PTP) – ideal em ambiente DSAS, já que toma partido da infra-estrutura de comunicações existente; ou IRIG-b / PPS – alternativa ao PTP, mas com necessidade de canal de comunicação dedicado.

De relevar que a necessidade de sincronismo é circunscrita aos IEDs que digitalizam as amostras fisicamente dos equipamentos primários (e.g. *merging units* -MU ou *Non-Conventional Instrument Transformers* - NCIT), de modo a que seja possível adquirir e datar as amostras em instantes precisos. Assim, caso não seja necessária a aquisição de amostras diretamente dos equipamentos primários pelo IED de painel, o sincronismo de alta precisão não é necessário na cadeia de aquisição, e todo o funcionamento - incluindo coordenação, redundância, seleção, discutidos posteriormente - é mantido com base na datação recebida das amostras já digitalizadas.

3.2 Módulo de subscrição

O módulo de subscrição de SV (Figura) é responsável pela identificação e filtragem dos pacotes necessários ao funcionamento do IED de painel.

Para este efeito são avaliados os seguintes parâmetros: de aplicação - SVID, APPID; de rede – tag VLAN e MAC de destino; e de integridade e consistência – tamanho da trama, ConfRev, DataSet, SampleRate, número de ASDUs e período médio de recepção. Esta filtragem deve ocorrer ao mais baixo nível possível, tirando partido de HW dedicado, já que envolve operações pesadas e muito dependentes do tráfego na rede de processo, de modo a evitar impacto no processamento da aplicação de mais alto nível.

O módulo de subscrição é também responsável pela subscrição de informação simulada em vez de adquirida diretamente do processo, de acordo com o processo descrito em IEC 61850 [1]. A subscrição de SV muda entre a informação do processo e a informação simulada, eventualmente existente na rede, de acordo com o *data object* LPHD.sim. Potencia-se, assim, a capacidade de isolar e testar partes do sistema de automação, mantendo o restante em operação normal - ferramenta poderosa e particularmente útil nas diversas fases do ciclo de vida do sistema de automação, do comissionamento à operação.

A supervisão da subscrição é outra componente fundamental do módulo de subscrição. Permite a validação dos pacotes recebidos com base no período de recepção esperado, o que aliado à filtragem e identificação dos pacotes já discutida, permite a eliminação da cadeia de aquisição de pacotes não conforme, bem como a marcação de falha de subscrição. Esta falha de subscrição permite que o sistema a jusante do módulo de subscrição se comporte de forma transparente, como se tivesse recebido informação de amostras inválida da rede. O tempo máximo de espera

por um pacote de SV até à falha é configurável, proporcionando ao engenheiro de sistemas a capacidade de o ajustar, já que este tempo está diretamente relacionado com a engenharia da rede de comunicações do barramento de processo.

Informações como a falha das subscrições de SV, número de pacotes falhados, número de pacotes fora de ordem, atrasos médios relativos e existência de informação de backup são produzidas pelo módulo de subscrição. Estas informações são úteis para diagnóstico e supervisão da rede de comunicação e dos IEDs de processo nas diversas fases do ciclo de vida do sistema de automação.

3.3 Módulo de recuperação de amostras

A principal função do módulo de recuperação de amostras é garantir a resiliência do IED de painel, quando exposto à operação normal numa rede de processo em ambiente DSAS.

A infra-estrutura de comunicação do barramento deve ser cuidadosamente desenhada para ser resiliente e evitar artefactos nefastos ao funcionamento normal do sistema, como perdas de pacotes ou atrasos excessivos dinâmicos ou constantes. Isto inclui utilização de protocolos de redundância sem perda de informação, como *Parallel Redundancy Protocol* (PRP) ou *High-available Seamless Redundancy* (HSR), e a configuração lógica e física da rede para separação e segregação de tráfego.

De qualquer forma, a possibilidade de perdas de informação na rede não pode ser descartada. Assim, um IED de painel bem construído deve ser resiliente a estas perdas, nomeadamente mantendo a operação estável das funções PAC que necessitam da informação eventualmente perdida.

Para o efeito, o módulo de recuperação de amostras implementa um método de interpolação, utilizando as amostras na vizinhança da zona da informação perdida para reconstruir o sinal original. Este processo mostra ser um equilíbrio entre a redução do erro ao reproduzir o sinal original, e ao mesmo tempo ser relativamente simples de implementar e não exigir recursos significativos, nem adicionar tempo de atraso de processamento excessivo, pois isso teria impacto no desempenho global do IED de painel.

O algoritmo de recuperação de amostras é exemplificado na Figura 2. A recuperação da informação perdida é executada após a recepção da amostra seguinte válida, garantindo que a recuperação acontece com perdas de até duas amostras consecutivas. A qualidade das amostras recuperadas, como definido em IEC 61850 7-3 [1], é igual à pior qualidade recebida nas amostras utilizadas no cálculo, sendo que posteriormente as amostras recuperadas podem ser utilizadas livremente noutro processo de recuperação.

A capacidade de recuperar até duas amostras perdidas consecutivas permite a perda de: até dois pacotes de rede com um ASDU – como definido em IEC 61850-9-2LE [7] para perfil de proteção; ou até um pacote com dois ASDU – como definido em IEC 61869-9 como perfil ideal para aplicações de medida e de proteção. Assim, garante-se uma resposta equilibrada entre resiliência à falha e erro produzido pela recuperação da informação perdida.

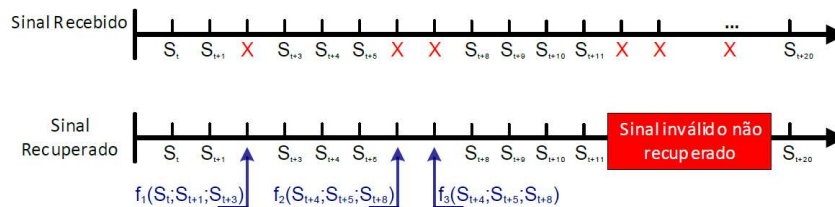


Figura 2 - Processo de recuperação de amostras

3.4 Módulo de *resampling*

O standard IEC 61869-9 [2] normalizou diversas frequências de amostragens e perfis de comunicação de *Sampled Values* indicados para proteção, para além das normalizadas na IEC 61850-9-2LE [7]. De modo a garantir a interoperabilidade ao abrigo destas novas normalizações, particularmente para as frequências de amostragem, é necessário que os IEDs de painel evoluam o seu funcionamento interno.

Os algoritmos PAC existentes nos IEDs de painel são tipicamente desenvolvidos com uma relação muito direta com a frequência de amostragem utilizada. Esta relação permite atingir padrões de desempenho elevadíssimos na decisão, enquadrando velocidade e qualidade da decisão tomada e contribuindo decisivamente para o desempenho global do sistema PAC. Exemplos dessa relação estendem-se dos filtros estimadores fasoriais diretos, passando pelas estimações de grandezas auxiliares necessárias (grandezas compostas, TRUE RMS, sequência de *Fortescue*, harmónicas, frequências, ROCOF etc...), até aos algoritmos de detecção de forma de onda integrados em decisões evoluídas específicas das proteções.

Deste modo, é integrado na cadeia de aquisição um módulo de *resampling* cuja função é converter a frequência dos sinais *Sampled Values* subscritos na frequência base comparável com todas as restantes fontes de informação analógica utilizada nas funções PAC. É fundamental que este processo não impacte significativamente no sinal original, o que significa que não poderá adicionar erro até às componentes de frequência máximas representadas pelo sinal subscrito, nem impactar diretamente nos algoritmos de detecção de forma de onda. Com vista a estes constrangimentos, o processo de *resampling* utilizado baseia-se no encadeamento de uma sobre-amostragem do sinal original até uma frequência que represente o mínimo múltiplo comum entre a frequência de entrada e a

frequência pretendida; seguido de uma filtragem digital adequada; seguido de decimação necessária para obter a frequência de saída pretendida. **Erro! Fonte de referência não encontrada..**

3.5 Módulo de coordenação

Com a informação analógica a ser recebida de diferentes fontes adquiridas em IEDs diferentes, dois casos podem surgir no IED de painel:

1. Uma função PAC utiliza informação de uma fonte única – por exemplo uma função de deslastre de frequência ou de tensão a utilizar informação de tensão de uma MU;
2. Uma função PAC utiliza informação de várias fontes diferentes – por exemplo uma proteção de Distância a utilizar informação de tensão subscrita da MU próxima dos TTs da linha e a corrente subscrita da MU próxima dos TCs da linha;

No primeiro caso, o algoritmo deve trabalhar independentemente da qualidade do sincronismo das amostras subscritas e ao ritmo a que elas são recebidas, sem qualquer interação com outras informações recebidas.

No segundo caso, é imprescindível que as amostras utilizadas pelo algoritmo estejam coordenadas temporalmente e que tenham sido adquiridas nos mesmos instantes temporais – ou seja, adquiridas com precisão temporal relativa melhor que 1 μ s. Esta coordenação, para os algoritmos PAC que dela necessitem, é da responsabilidade do módulo de coordenação.

O módulo de coordenação só poderá funcionar com amostras adquiridas de forma síncrona relativamente entre si. Assim descarta da coordenação qualquer amostra que não cumpra este requisito recorrendo a: análise da informação de SmpSynch – caso de subscrição de SV; datação interna do HW - caso de amostras localmente adquiridas; datação e informação de sincronismo dos pacotes – amostras recebidas remotamente por IEEE C37.94.

Assim, o módulo coordena todas as amostras não rejeitadas pelo módulo de subscrição e aceites pelo critério de sincronismo, e disponibiliza a informação de amostras de todos os canais adquiridas recentemente o mais rapidamente possível. Ao produzir um output completo de todas as fontes de amostras válidas para coordenação, o módulo produz naturalmente informação a um ritmo variável, dinamicamente adaptado ao ritmo da recepção das amostras recebidas com maior atraso. A fonte com maior atraso poderá variar por dinâmica da rede de comunicações, ou mesmo por desaparecimento ou aparecimento de outra fonte com maior atraso a chegar ao IED de painel, logo a informação coordenada adaptar-se-á dinamicamente ao novo estado de equilíbrio, acelerando ou desacelerando o output de amostras.

As fontes com menor atraso têm as suas amostras guardadas para serem disponibilizadas quando as amostras correspondentes das fontes com maior atraso chegarem. Há assim um atraso de coordenação para as fontes com menor atraso – equivalente à dispersão na recepção das amostras. Este tempo de dispersão é supervisionado em tempo real, já que afeta diretamente o tempo de reação das decisões do algoritmo PAC, e pode ser limitado por parâmetro definido pelo engenheiro de sistema. Fontes de amostras que estejam a ser recebidas com tempos de dispersão superior ao limite são também rejeitadas da coordenação, de modo a não impactarem as restantes.

O processo de coordenação é mostrado na Figura 3.

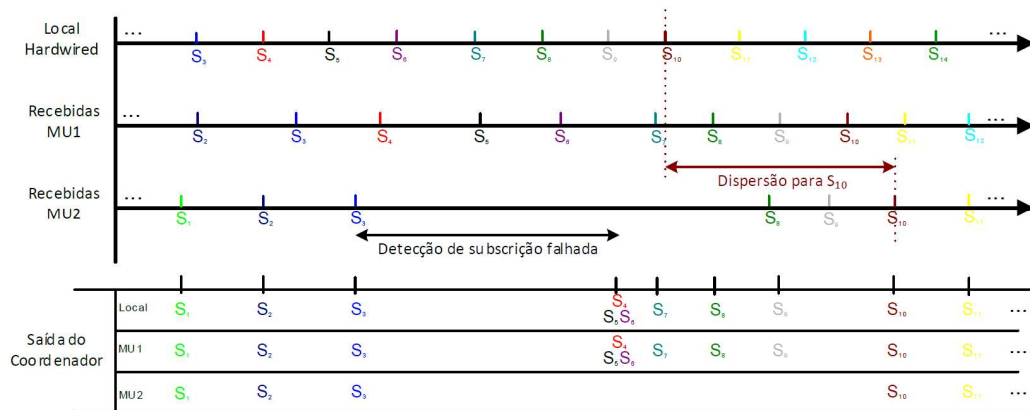


Figura 3 - Processo de coordenação

3.6 Redundância de MU

A disponibilidade e confiabilidade dos sistemas de automação são críticas. É assim muito importante dotar a DSAS de resiliência à falha de informação vital à sua operação – seja informação vinda do processo como estados dos equipamentos primários ou informação analógica, ou informação de decisão para o processo, como ordens de disparos aos disjuntores.

A perda por falha de unidades de processo que adquirem informação analógica pode levar à indisponibilidade no sistema de funções vitais PAC, como proteção diferencial de linha ou de transformador ou funções de disjuntor. É

garantir coerência nas decisões durante a troca de informação analógica utilizada (e.g. garantir nova gestão memórias e *reset* de máquinas de estado internas).

O IED de painel fica assim dotado de diversas potencialidades arquiteturais que permitem toda uma nova versatilidade do sistema. Alguns destes casos são listados em seguida:

- Segundo nível de redundância – Capacidade de ter um segundo nível de redundância onde a informação analógica utilizada por cada algoritmo é gerida por lógica específica de utilizador em funcionamento, com base em informações geradas no sistema em tempo real (exemplo: qualidade reduzida de uma fonte de amostras; desconfiança na medida de amostras de uma fonte; manutenção de parte do sistema ou outros).
- Seleção de grandezas por topologia – Capacidade de decidir em tempo real, a partir da topologia do sistema, que fontes de amostras são utilizadas para cada função PAC, possibilitando soluções integradas digitais para seleção de tensões para verificação de sincronismo nos disjuntores, ou seleção das melhores correntes da linha em topologias complexas, entre outras.
- Integração nativa de teste – Capacidade de ter no sistema uma fonte de amostras configurada que sirva apenas para teste, não sendo adquirida do parque. Ao ter esta fonte previamente configurada, é possível a qualquer momento gerar as amostras de testes pretendidas com as características configuradas e selecionar esta fonte para os algoritmos a testar, isoladamente e sem interação com o resto do sistema PAC, incluindo dentro do próprio IED de painel (o que não é possível utilizando apenas o processo standard de subscrição de informação simulada definido em IEC 61850 [1]).

4.0 RESULTADOS

A cadeia analógica proposta foi implementada num IED de painel com o objetivo de ser extensivamente testada em laboratório com meios de ensaios específicos para DSAS. Alguns resultados dos testes realizados são apresentados em seguida. Adicionalmente são descritos alguns resultados obtidos pela monitorização do funcionamento do mesmo tipo de IEDs operando numa instalação real.

4.1 Testes laboratoriais

O foco dos testes foi a medição do tempo de atuação das funções principais de proteção e a resiliência da cadeia analógica a falhas, seja de comunicação seja de sincronismo. Os defeitos no sistema de energia foram simulados e os tempos de disparo medidos através de um gerador de sinal comercial tipicamente usado para ambientes de testes secundários.

Um exemplo de um teste realizado é descrito em seguida. O defeito aplicado foi o mesmo para todos os testes e definido de modo a que as condições de defeito permitissem alcançar o melhor tempo de decisão possível com o algoritmo de proteção implementado nos IEDs. Desta forma, a incerteza associada ao tempo de reação da função foi eliminada e, portanto, sem perda de generalidade, foi possível relacionar de forma direta o tempo de reação da proteção com o desempenho da cadeia analógica apresentada neste informe.

Um cenário de subestação digital típico foi usado para a análise de desempenho. O sistema de teste inclui uma *merging unit* adquirindo os sinais analógicos e publicando *Sampled Values*; e um IED de painel com possibilidade de subscrição de *Sampled Values*, em paralelo com sinais analógicos adquiridos localmente. Para *benchmark*, foi utilizado um sistema com um IED de painel da mesma família, mas apenas com aquisição analógica convencional a fio. Ambos os sistemas estão representados na Figura 5.

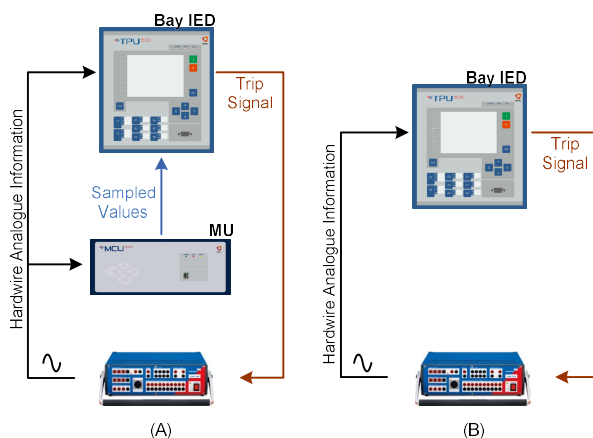


Figura 5 - Ligações cabladas locais e subscrição de SV: (A) sistema de teste; (B) sistema de *benchmark*

O teste foi repetido 400 vezes e os resultados são apresentados na tabela seguinte. Como se pode verificar, obtém-se tempos de disparo para a nova solução proposta muito perto dos obtidos anteriormente com relés com aquisição a fio.

Tabela 1 - Resultados de desempenho: ligações cabladas locais e subscrição de SV

Cadeia de aquisição analógica	Tempo máximo de disparo [ms]	Tempo mínimo de disparo [ms]	Tempo médio de disparo [ms]
Proposta no IT	12.2	10.3	11.6
Sistema de benchmark	10.8	9.3	9.9

Foram também executados testes para validar o desempenho do algoritmo de redundância de *merging units* proposto. Nestes ensaios, um IED de painel subscrevia *Sampled Values* de duas *merging units* distintas, ambas publicando os mesmos sinais. Para simular a pior condição de teste possível, uma falha de comunicação com a *merging unit* principal era simulada de forma síncrona com a ocorrência de um defeito, o que implica que o IED de painel deve substituir as amostras pelas da *merging unit* de backup no momento de injeção do defeito. O defeito simulado foi o mesmo do teste anterior, de modo a poder comparar diretamente os resultados.

Observou-se que os tempos de disparo registados na tabela anterior não sofreram alteração significativa, mesmo com falha de comunicações no instante mais crítico, o que prova a robustez e eficácia do algoritmo proposto.

4.2 Resultados de experiência em instalação real

Foram também registados vários resultados e indicadores dos IEDs de painel com a nova cadeia analógica, num sistema real localizado numa subestação em Portugal. O desempenho do sistema foi também comparado com o sistema convencional que já se encontrava em operação. Para tal, foram calculados diversos indicadores, de acordo com as métricas indicadas na Tabela 1. Os resultados apresentados correspondem a mais de um ano em operação contínua em campo do novo sistema.

Tabela 2 - Métricas recolhidas numa instalação real

Métrica	Unidade	Valor à data
Número de defeitos e outros eventos registados quando comparado com o sistema convencional	un/un	7/7
Percentagem de atuações corretas do sistema de proteção (disparo ou só arranque)	%	100%
Número de ocorrências de perda de mensagens na rede de processo	Un	19
Número de falhas de sincronismo horário	Un	0
Tempo acumulado de bloqueio do sistema de proteção por erros de comunicação ou sincronização	S	47ms
Disponibilidade do sistema de proteção e controle	%	>99,9999%

Durante todo o período de funcionamento do sistema, este manteve-se constantemente disponível e funcional. Talvez o fato mais surpreendente foi uma completa ausência de falhas de sincronismo, ponto que tem sido muitas vezes apontado como um dos mais sensíveis das subestações digitais. O sistema mostrou também uma resiliência excelente aos poucos erros que surgiram, sendo que superou a grande maioria deles sem perder nenhuma informação.

Em resumo, o sistema, durante todo o período de teste:

- Registou corretamente todos os eventos e oscilografias que deveria ter registado e quando comparado com o sistema existente, e com maior precisão.
- Não teve quaisquer erros de atuação, leitura, ou registo incorreto;
- Teve uma disponibilidade praticamente total, assinalando-se apenas cerca de dois ciclos (47ms) de bloqueio acumulado da função principal em mais de um ano de funcionamento. Se considerarmos as funções de reserva (IO>, I>) o sistema não esteve um único milissegundo indisponível.
- Não registou qualquer falha de sincronismo horário de qualquer um dos seus componentes: mantiveram todos um sincronismo de acordo com a norma (abaixo dos 200ns) 100% do tempo durante mais de um ano;

5.0 CONCLUSÕES

No artigo pudemos analisar as arquiteturas das DSAS aplicada a área de Transmissão, a digitalização da aquisição analógica para o IEDs e os resultados alcançados, entretanto destacamos a mudança de paradigma como um fator primordial para o sucesso das implantações das DSAS, onde verificamos as mudanças entre a subestação atual e uma subestação digital; saem as borneiras e entra o backbone, sai a fiação e entra o baud rate (bps), sai o contato seco e entra a bridge, sai o link de corrente e entra o firewall, sai o jumper e entra FTP, sai o Ampère e entra o

gateway e sai o fechamento de neutro e entra o HTML, como também saem os elétrons e entram os fótons transmitindo informações em fibra ópticas, sem deixar de pensar na documentação final do projeto implantado. Essa mudança grande de paradigma fará com que as corporações criem planos de ações para treinamentos dos colaboradores, pois há uma necessidade de atualização do conhecimento das equipes de engenharia, manutenção e de operação dos sistemas.

As DSAS trazem vantagens econômicas claras em sua implantação, pensando numa arquitetura onde os TPs, TCs e Disjuntores são os convencionais, há reduções de custos no lançamento de cabos e canaletas é possível verificar uma redução de 88%, nos reles digitais (IEDs) uma redução de 40% no comissionamento dos sistemas uma redução de 75% e nos painéis verifica-se uma redução de 69%. Nesse tipo de subestação temos um incremento das *Merging Units* que impactam em aproximadamente positivamente na ordem 3% nos custos. Assim é possível considerar de uma forma geral que é uma solução extremamente vantajosa economicamente em sua implantação. A redução do TCO é um fator chave para os sistemas de próxima geração.

Um fator essencial é a preservação da vida dos engenheiros e técnicos nesses projetos, pois a redução do risco de acidentes se torna potencialmente reduzido, por eliminar o compartilhamento elétrico do circuito de corrente até o painel de proteção. Além disso, o sistema também reduz o risco de desligamento acidental, provocado por eventuais impactos ou vibração de painéis, o que se traduz em maior disponibilidade e confiabilidade da estrutura, no aspecto da montagem, o Process Bus também oferece o benefício de reduzir falhas e tempo de montagem, pois conta com um número reduzido de conexões elétricas.

Nas arquiteturas de sistemas destacam-se que o Interface do Utilizador (IHM); SCADA local; Histórico de instalação; Múltiplos clientes e acesso seguro (*web*); Telas gráficos vetoriais 2D; Gestão de alarmes; Relatórios e notificações; *Trending*; várias opções de sincronização horária (GPS, NTP, PTP, IRIG-B ou protocolo de comunicação), Ferramentas completas de auto-diagnóstico e de resolução de problemas (Registos, Rastreo e diagnóstico de protocolos de comunicação e Supervisão SNMP, atendem fielmente aos projetos de subestações digitais e são escaláveis e interoperáveis com demais sistemas.

Finalizando não podemos deixar de relacionar que há questões-chave a serem abordadas para a implantação das DSAS: Habilidade e Cultura organizacional das equipes, Projeto do Sistema, Interoperabilidade, Segurança Cibernética, Comissionamento, Testes e Ciclos de Inovação Tecnológica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] IEC TC57, IEC 61850 series of standards and technical reports, IEC, 2007-2021
- [2] IEC TC 38, IEC 61869-9 Instrument transformers - Part 9: Digital interface for instrument transformers, IEC. 2016-04-27
- [3] IEEE C37.94-2017 - IEEE Standard for N times 64 kbps Optical Fiber Interfaces between Teleprotection and Multiplexer
- [4] R. D. JORGE et al., Application of Digital Technology in Primary Distribution Substations, PAC World Conference, 2018
- [5] J. PERES et al., Analogue Acquisition Chain for Bay Level IEDs with Real-time Merging Unit Redundancy Capabilities in Digital Substation Automation Systems, PAC World Conference, 2019
- [6] IEEE/IEC 60255-118-1-2018 - IEEE/IEC International Standard - Measuring relays and protection equipment - Part 118-1: Synchrophasor for power systems – Measurements
- [7] Implementation Guideline for Digital Interface to Instrument Transformers using IEC 61850—9-2
- [8] P. MOHAPATRA et al., "Fitness: GB's Pilot Multi-Vendor Digital Substation – Commissioning and Site Trial Experience (Wishaw, Scotland)", PACWorld Conference, 2019
- [9] K-P BRAND, Multi-functional IEDs and process bus, the direct path to centralized substation protection and control, PAC World Conference, 2017
- [10] T. BUHAGIAR, S. RICHARDS, J. P. CAYUELA, M. BOUCHERIT, J. F. MIRONNEAU, J. L. RAUON, Integration of an IEC 61850 process bus in an existing substation, CIGRE, 2016
- [11] D. DOLEZILEK et al., Cost and Performance Comparison of Numerous in Service Process Bus Merging Unit Solutions Based on IEC 61850, PAC World Conference, 2019

DADOS BIOGRÁFICOS



Rui Dias Jorge trabalha na Efavec há mais de 20 anos e é atualmente o responsável pela Gestão de Produto do negócio PAC. Com experiência extensa em Inovação e Desenvolvimento, participou ao longo da sua carreira em múltiplos projetos de I&D relacionados com a proteção e controle de sistemas de energia. Tem uma licenciatura em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores (1997) pelo Instituto Superior Técnico em Lisboa e um Mestrado em Inteligência Artificial Aplicada (2005) pela Universidade Nova de Lisboa. É membro do comité B5 do CIGRÉ e co-autorou diversos artigos técnicos.

(2) JOÃO VÍTOR VIEIRA PERES

João Peres colabora com a Efavec desde 2010, é atualmente coordenador e arquitecto de algoritmos e soluções no Departamento de I&D PAC da Efavec Automation, geriu vários projetos de I&D na área da P&C de Sistemas Automação digital e tem vasta experiência em actividades de I&D para soluções de PAC. Possui o Mestrado em

Engenharia Eletrotécnica e de Computadores com especialização em sistemas de potência pelo IST de Lisboa. Suas principais áreas de interesse são: PAC de Sistemas de Energia; Subestação digital; Energia renovável e redes inteligentes; Algoritmos estimadores e filtragem digital; Sistemas Embebidos em Tempo-Real.

(3) FRANCISCO M PIRES NETO

Francisco Manuel Pires Neto Mestre Engenharia Elétrica e Telecomunicações, Mackenzie (2000), Especialização Digitalização de Subestações IEE/USP. Mais de 40 anos atuando em GTD de energia elétrica nas LIGHT, ELETROPAULO, EDP S.P. e EDP Brasil. Gestor Sistemas Controle até dezembro 2013 atuando: telecomunicações, proteção, controle, medição, automação subestações e rede MT, automação de centros controle, gestão de TI Operacional. Gestão de Projetos de P&D&I, Co-autor do Proj. Sensores fibra óptica: kV, MW, A p/ BT, MT e AT, duas patentes no INPI com CPqD. Atua hoje P&D&I, assessora empresas de tecnologia na entrada no setor elétrico.

(4) NATHALIA ROBERTA FERREIRA DE MIRANDA

Nathalia Miranda possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Nove de Julho (2014). Atualmente é Gerente Comercial da Power Solutions Brasil Sistemas de Automação e Potencia LTDA e possui experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em Automação de Sistemas de Energia.