



**XXIII SNPTTE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

FI/GTL/08
18 a 21 de Outubro de 2015
Foz do Iguaçu - PR

GRUPO – XV

**GRUPO DE ESTUDO DE SISTEMAS DE INFORMAÇÃO E TELECOMUNICAÇÃO PARA SISTEMAS
ELÉTRICOS- GTL**

COMUNICAÇÃO EM REDES ELÉTRICAS INTELIGENTES

**Cristiano Henrique Ferraz (*)
NETCON LTDA**

**Lyno Henrique Gonçalves Ferraz
UFRJ**

**André Camargo Langrafe
NETCON LTDA**

RESUMO

O conceito de redes elétricas inteligentes foi criado para padronizar as comunicações entre dispositivos e permitir o controle distribuído e inteligente das redes elétricas. A coleta e a transmissão dos dados em tempo real permitem um processamento imediato, inserido no contexto da operação automática e autônoma das redes, para uma maior confiabilidade, maior eficiência energética, maior qualidade e maior disponibilidade do sistema. O modelo exige redes de comunicações de suporte de alta disponibilidade e alta confiabilidade.

O objetivo deste Informe Técnico é abordar os elementos básicos das redes elétricas inteligentes, com foco nos projetos das redes de comunicações de suporte.

PALAVRAS-CHAVE:

Smart-Grid; Rede-Inteligente; Comunicações; Latência, PMU

1.0 - INTRODUÇÃO

Durante décadas, o controle da geração, da transmissão e da distribuição de energia elétrica dependeu de dispositivos de coleta de dados e atuadores telecomandados com necessidades de comunicação críticas com respeito à confiabilidade, resiliência e à garantia de baixas latências, que, contudo, geravam um volume de tráfego bastante modesto. O tráfego local de dados gerado tanto nas usinas geradoras quanto nas subestações podia ser atendido por redes locais de baixa ou média velocidade binária baseadas em conexões por pares metálicos ou por barramentos de fibras ópticas de velocidades relativamente baixas. As aplicações de comunicação à distância, principalmente para aplicações de teleproteção e teled medição nas redes de transmissão e de distribuição de energia elétrica podiam ser implementadas mediante um suporte de telecomunicações baseado em sistemas tradicionais como PDH, SDH e OPLAT. Os barramentos e redes locais e as redes de comunicação à distância utilizam padrões, equipamentos e tecnologias estáveis, conhecidos e muito sólidos. Devido ao fato de constituírem sistemas fechados e redes isoladas, de acesso fisicamente restrito, e de utilizarem padrões fechados de comunicação, não apresentavam maiores problemas de segurança da informação. Tudo isto muda com o advento de redes elétricas inteligentes ou *Smart Grids*.

As *Smart Grids* encaixam-se em um conceito mais amplo, o conceito de IoT (*Internet of Things*), que está revolucionando toda a maneira de controlar máquinas distribuídas cada vez mais complexas, muitas vezes, valendo-se de novos processos heurísticos, implementando funções de Inteligência Artificial e utilizando padrões abertos e um acesso universal por uma grande diversidade de meios de transmissão.

Todos os estudos e casos reais de implementação de *Smart Grids* indicam de forma clara e taxativa a grande importância de um correto planejamento da infraestrutura de comunicações como parte essencial das redes.

Essa nova forma de controlar aquela que hoje é a mais complexa máquina já criada pelo homem, o sistema Integrado de geração e transmissão (e, agora também, de distribuição) de energia elétrica de grandes países, tem implicações profundas para todos aqueles que atuam no sistema eletroenergético.

Uma das implicações de maior impacto do ponto de vista de planejamento das redes de comunicações é a introdução de um grande número de unidades medidoras fasoriais sincronizadas (PMUs) incluídos em diversos dispositivos de rede. As previsões para o número de PMUs ao final da década atual indicam uma quantidade de milhares de unidades nos barramentos das redes dos principais países com sistemas integrados. Inclusive, prevê-se que os novos dispositivos de rede já trarão de fábrica PMUs incorporadas, e que, se houver disponibilidade de uma infraestrutura de comunicações, aplicações adequadas e processadores distribuídos, poderão ser utilizadas, bastando para isso pagar uma licença de uso.

A medição fasorial permite obter valores medidos com rapidez e exatidão, com uma taxa de amostragem muito superior à que anteriormente se obtinha com dispositivos tradicionais. Essa característica irá permitir atuar em tempo real sobre as redes, inclusive com a capacidade de detecção de tendências e acionamento de proteção preventiva, o que evitará que eventuais falhas se propaguem e permitirá que fiquem circunscritas ao local da ocorrência. Também irá permitir um melhor controle da tensão. Entretanto, é preciso tomar em conta o crescimento exponencial da quantidade de dados a serem transmitidos e processados devido à proliferação das PMUs.

Algumas preocupações irão nortear o projeto das redes:

- A infraestrutura de comunicações deverá suportar a transmissão de enormes quantidades de dados;
- A sincronidade entre os sensores distribuídos torna-se crítica;
- A latência da rede de comunicações deve ser controlada rigorosamente;
- O processamento dos dados medidos deve ser distribuído.

O requisito de processamento distribuído, ou seja, o princípio de “levar as aplicações até os dados em vez de levar os dados até as aplicações”, deve-se a dois fatores: por um lado, os dados obtidos crescem exponencialmente (grande quantidade de amostras por ciclo e profusão de sensores e medidores), logo uma capacidade de processamento distribuída atende melhor a esse cenário ao reduzir a necessidade de processamento remoto e ao restringir a uma área local a transmissão dos dados brutos; por outro lado, as aplicações em tempo real não suportam latências grandes, pois as análises, para serem oportunas, principalmente para a detecção preventiva de eventos e tendências, devem ser realizadas em poucos milissegundos.

Em todo caso, os quadros transportados devem seguir o formato do padrão C37.118, e deve existir um *middleware* para mover os dados utilizando uma arquitetura *publish / subscribe*. As bases de dados devem estar distribuídas e localizadas nas subestações.

As principais considerações de arquitetura a tomar em conta ao planejar o suporte de comunicações para *Smart Grids* podem ser resumidas no fluxograma seguinte.

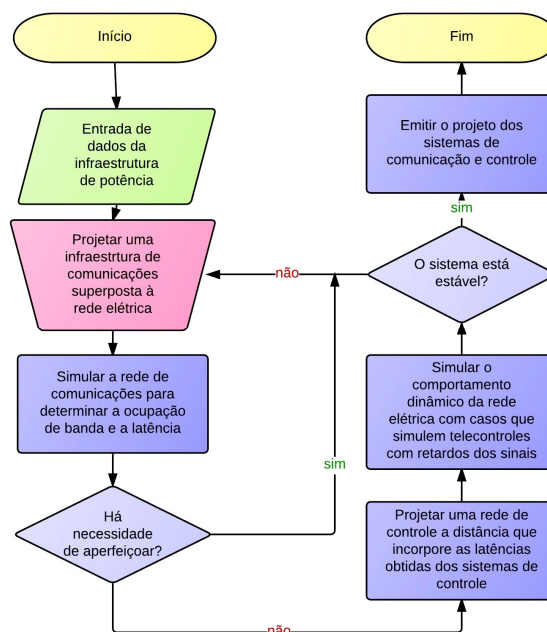


FIGURA 1: Processo para o projeto do sistema de comunicações.

As considerações relativas à latência e à banda são vitais para o projeto da infraestrutura de comunicações. Os resultados das simulações permitem aperfeiçoar o projeto dos sistemas de comunicação. Caso os sistemas sejam instalados sem simulações e a partir de premissas estimadas, é possível que os sistemas não atendam às reais necessidades de latência, banda, resiliência e confiabilidade requeridas pelas novas aplicações.

2.0 - CONSIDERAÇÕES SOBRE A LATÊNCIA

Uma baixa latência é fundamental para aplicações de controle da estabilidade da rede, por exemplo. Com o advento de detectores e medidores de transientes e seu uso para a predição de eventos e prevenção e isolamento de falhas, os requisitos da latência da comunicação entre IEDs e os controladores se reduzem fortemente.

Estudos em empresas que começam a empregar PMUs para as medições nos barramentos indicam que a banda disponível, a carga de tráfego em relação à banda disponível, o número de saltos entre os dispositivos que se comunicam e a distância física (retardo de propagação) afetam fundamentalmente a latência. Por exemplo, estudos recentes realizados pelo WECC (*Western Electricity Coordinating Council*) nos Estados Unidos indicam retardos médios entre subestações e centros de controle da ordem de 40 ms em enlaces TDM de 10 Mbit/s, porém mais de três vezes maiores (cerca de 130 ms) no caso de enlaces de 3 Mbit/s [5]. Em cenários envolvendo a passagem por 6 subestações, podem alcançar 80 ms e 210 ms, respectivamente. O impacto desses retardos sobre o controle da amortização e acionamento dos estabilizadores do sistema de potência (PSS) é notável, podendo, conforme a latência nas comunicações, as instabilidades estender-se de alguns segundos a dezenas de segundos.

O planejamento das aplicações e das redes de comunicações precisa tomar em conta essas novas aplicações. O planejamento deve considerar, além da implantação do controle distribuído, os retardos inerentes aos sistemas de transmissão de dados, tanto no âmbito das redes locais quanto nas comunicações de longa distância. Alguns princípios básicos devem ser considerados em todos os projetos:

- Prover banda suficiente para dar passagem, sem a formação de filas, dos grandes volumes de dados gerados, tomando como base para a estimativa de tráfego os instantes próximos à ocorrência de eventos, quando esses volumes tendem a crescer acentuadamente.
- Reduzir ao máximo os passos por comutadores de dados, particularmente em dispositivos de redes operando em níveis 2 e 3 e, mais ainda, considerar a possibilidade de interconexão direta em nível 1 ou 2 entre subestações e entre estas e os centros de controle, sem a intermediação de algum nó de comutação centralizado (de nível 1 – *cross-connect TDM* –, nível 2, MPLS ou nível 3);
- Reduzir as distâncias físicas em fibras ópticas, e, particularmente, levar em conta no projeto as possíveis voltas longas do tráfego nos grandes anéis ópticos de longa distância sobre fibras em cabos OPGW em condição de comutação de proteção

Além desses princípios cuja finalidade é reduzir a latência, a engenharia dos sistemas deve procurar conhecer as latências reais e inevitáveis nas redes de comunicação, e, ao evidenciá-las, nortear a arquitetura que conduz à localização da distribuição das aplicações segundo o princípio já apresentado de “levar as aplicações até os dados em vez de levar os dados até as aplicações”.

3.0 - OUTRAS CONSIDERAÇÕES

Todas as áreas promissoras da geração e transmissão das redes elétricas inteligentes – Recursos Energéticos Distribuídos (DER), Energia Renovável Distribuída (DRE), Geração e Armazenamento Distribuídos (DG e DS), Eficiência Energética (EE), Resposta à Demanda (DR) e Controle de Carga (LC), apresentam seu próprio conjunto de desafios técnicos e não técnicos. Entretanto, há algumas tecnologias transversais (*cross-cutting technologies*), e algumas demandas comuns sobre a infraestrutura de comunicações.

Um elenco dessas tecnologias transversais, que ao mesmo tempo representam um grande desafio para os planejadores das redes, é o seguinte:

- Sistemas de comunicação seguros e confiáveis que possam manejar grandes volumes de dados.
- Novos algoritmos de controle sofisticados para gerenciar a confiabilidade, a eficiência e a demanda no sistema eletroenergético.
- Modelagem precisa e ferramentas de previsão.
- Capacidade de monitoração do estado dos itens de inventário, inclusive análise de dados de sensores para prever e evitar falhas dos equipamentos.
- Arquitetura que contemple a recuperação automática e a degradação gradual e suave.
- Alta penetração de energia renovável, armazenamento de energia, geração distribuída e veículos elétricos.
- *Microgrids* interconectadas.
- Alta penetração de transmissão em corrente contínua de alta e de média tensão (HVDC e MVDC).

Paralelamente, a operação do sistema sofrerá mudanças importantes:

- Decisões cada vez mais automáticas relacionadas com a estabilidade e a confiabilidade do sistema.
- Ferramentas evoluídas de *situational awareness* e suporte operacional rápido.
- Gerência e operação em tempo real mediante sistemas integrados.
- Sistema de distribuição modelado como uma rede.
- Gerenciamento da demanda mediante regulação de tensão.
- Melhores ferramentas de controle do sistema para um aumento acentuado do volume de transmissão efetiva.
- Integração da energia de *microgrids*, DRE e DER.

Uma preocupação adicional com essa nova arquitetura é a segurança dos dados e do acesso ao controle do sistema eletroenergético. A segurança cibernética deve estar completamente integrada com os sistemas de TI. Entretanto, é preciso tomar em conta os requisitos de segurança também no projeto da infraestrutura de comunicações. A segurança deve, necessariamente, fazer parte do planejamento e dos projetos não apenas de TI, mas também das redes de comunicação. Além de incorporar métodos e arquiteturas visando à prevenção de intrusão, os sistemas de comunicação devem incluir métodos de detecção ativa e rastreamento de ameaças.

É preciso tratar de remover alguns empecilhos previsíveis para a implementação dos conceitos de *smart grid* no sistema, no tocante à infraestrutura de comunicações.

A maior prioridade dos planejadores deve ser substituir a atual infraestrutura de comunicações, que, de forma geral, é inadequada para os requisitos de banda, de cobertura e de latência para as aplicações de telemetria. A segunda maior prioridade é elaborar planos para uma transição economicamente eficaz aos novos protocolos de comunicação padronizados. Finalmente, um problema ainda em aberto é como solucionar a adequação dos sistemas de TI aos padrões de longevidade e confiabilidade do setor elétrico, especialmente tendo em vista que os recursos de processamento terão de ser instalados em campo, junto às concentrações de dispositivos inteligentes de telemetria.

Outro ponto a considerar é a infraestrutura de comunicações necessária para suportar múltiplas interconexões robustas em campo. As soluções de mercado para esse tipo de cobertura não atendem, via de regra, aos requisitos do setor elétrico. Portanto, há uma defasagem entre as redes públicas de comunicações e as necessidades do setor elétrico. É preciso criar novos modelos, validá-los e desenvolver padrões para que as soluções adotadas sejam economicamente viáveis.

4.0 - CONSIDERAÇÕES SOBRE A MEDIÇÃO DE SINCROFASORES

Embora o foco deste Informe Técnico seja a infraestrutura de comunicações para suporte a uma rede elétrica inteligente, como a medição fasorial vem cobrando uma importância crescente na Rede de Transmissão Inteligente (STG, *Smart Transmission Grid*), algumas breves considerações sobre o suporte a PMUs tornam-se oportunas.

A transição das redes de transmissão atuais para STGs irá depender da instalação de PMUs em toda a rede, de uma melhora contínua do suporte de comunicações, de uma rede de sincronismo de fase exata superposta à rede de comunicações e do desenvolvimento de novos aplicativos de processamento dos dados das medições.

Em anos recentes, muitos sistemas de monitoração de área ampla (WAMS) foram implantados em todo o mundo. Esses sistemas continuam sendo constantemente aumentados e atualizados para atender aos novos requisitos de desempenho, de entrega e de armazenamento dos dados e informações. O número de PMUs continua a aumentar, e cada vez mais os próprios equipamentos do sistema elétrico incorporam PMUs. Ao mesmo tempo, inúmeras aplicações novas para o tratamento e utilização dos dados dessas PMUs têm sido introduzidas, assim como propostas para a concentração de dados de sincrofases.

A principal característica da medição fasorial é a grande quantidade de dados medidos (várias amostras por ciclo da onda do sinal elétrico), e a necessidade de seu tratamento em tempo real (particularmente para a estimativa do estado e atuação de medidas preventivas de falhas). É preciso desenvolver modelos de comunicação local *plug-and-play* (redes *ad hoc*, com baixo retardo e banda suficientemente grande) entre as PMUs de um *cluster* e concentradores locais e processadores junto aos pontos de coleta, mas que também suportem o transporte imediato dos dados concentrados e processados em informações que devem chegar em tempo curtíssimo aos centros de controle do sistema. Este desafio requer simulações e soluções distintas às que normalmente são empregadas em redes de área de campo (FANs), e constitui uma preocupação necessária dos planejadores de redes de comunicações.

Soluções como FIPS (*Flexible Integrated Phasor Systems*) podem constituir uma alternativa de baixo custo ao envio de dados brutos das medições fasoriais a centros de coleta e concentração de dados, dados esses que nas soluções atuais devem ser reenviados às transmissoras e aos operadores independentes (ISOs) através de redes existentes como aquelas baseadas em ICCP (*Inter-Control Center Communication Protocol*). A figura abaixo ilustra o conceito de FIPS.

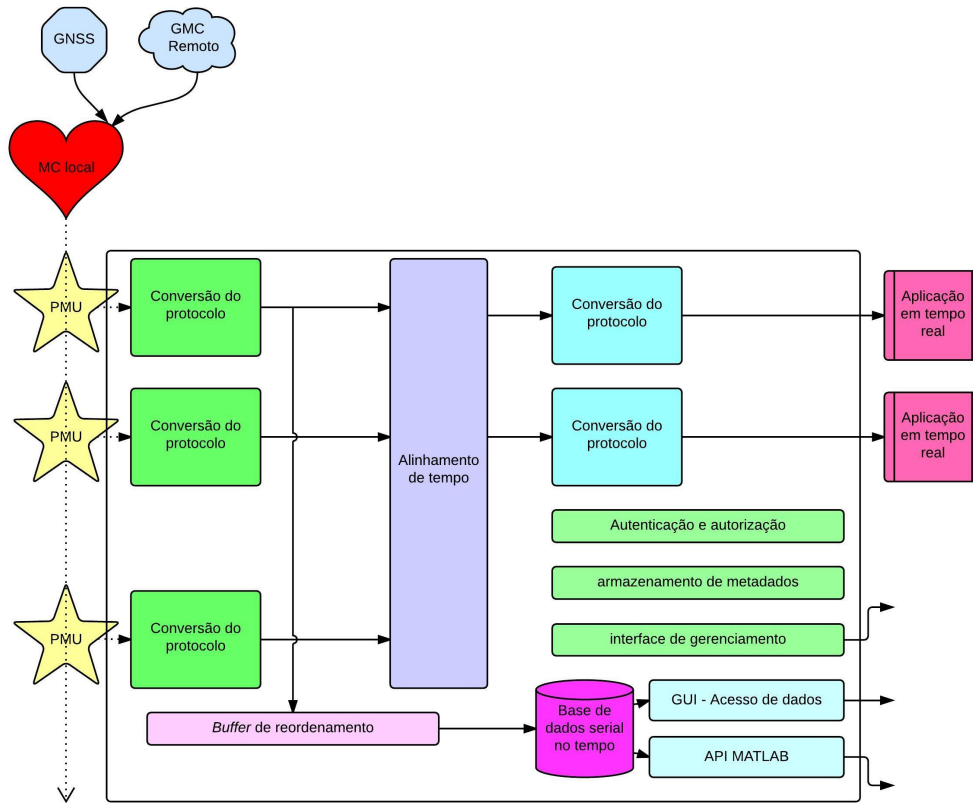


FIGURA 2: O conceito de FIPS (*Flexible Integrated Phasor System*).

5.0 - CONSIDERAÇÕES SOBRE AS OPÇÕES TECNOLÓGICAS DISPONÍVEIS

Como se viu nos itens anteriores, é de vital importância nas redes elétricas inteligentes o papel representado por redes de comunicações rápidas, confiáveis e seguras. A rede é necessária para conectar a grande quantidade de dispositivos elétricos em localidades distribuídas, tanto entre si quanto com concentradores e processadores locais e remotos. A rede deve permitir o intercâmbio oportuno de informações e sinais de controle. O conceito de inteligência distribuída pela rede toda só é possível se esse intercâmbio puder realizar-se de forma segura, imediata, confiável e robusta.

As funções dos sistemas de comunicações atuais encontram-se limitadas a pequenas regiões onde estão implementadas funções básicas de controle e monitoramento, tais como PLC e sistemas SCADA. Tais sistemas não atendem à demanda dos sistemas de gerenciamento automatizado e inteligente de nova geração.

Os novos sistemas repousam sobre uma base de comunicações bidirecionais em tempo real que deve suportar exigências críticas quanto ao volume de dados e à latência.

Outra consideração importante é de que é preciso contemplar claramente e com muito cuidado as implicações e limitações das tecnologias de redes estatísticas em que se baseiam algumas redes modernas. Não apenas Ethernet converte-se no padrão básico de comunicação entre dispositivos e entre estes e concentradores e processadores distribuídos: também as comunicações de longa distância baseiam-se em IP e em redes de transporte de pacotes (PTN). É preciso ter em conta as características das PTNs para que o manejo de latências que variam segundo o volume instantâneo de tráfego oferecido seja conhecido, seja reduzido e se mantenha sob controle. E é preciso entender claramente as limitações e as aplicações de técnicas utilizadas na virtualização das redes de comunicação, como túneis construídos sobre *backbones* com MPLS para tráfego de tempo real. O planejamento cuidadoso, o conhecimento e o controle esmerado do roteamento, além de uma excelente engenharia de tráfego, são as únicas maneiras de assegurar que o uso de novas técnicas de transporte atendam às necessidades das aplicações de controle e monitoramento em tempo real.

Muitos estudos têm sido feitos para avaliar o impacto das redes sobre o tráfego muito aumentado de dados nas redes elétricas inteligentes (a bibliografia ao final deste Informe Técnico contém algumas referências que trazem os dados obtidos através desses estudos). Contudo, recomenda-se que as empresas de energia realizem seus próprios estudos e suas próprias simulações, possivelmente em parceria com as universidades, as quais mantêm

atualmente em seus programas de pós-graduação pesquisas importantes sobre a infraestrutura de comunicações das *smart grids*.

De maneira geral, as tecnologias mais modernas de redes não têm penetrado suficientemente nas redes elétricas para a melhoria do controle e gestão do sistema elétrico. Ao desenvolver a rede elétrica inteligente, é vital fazer uso dos avanços nas tecnologias de rede para permitir a implantação das novas aplicações.

A infraestrutura de comunicações para uma SG (*Smart Grid*) divide-se em uma estrutura de comunicação à distância e estruturas de comunicação locais.

- a) WANs (*Wide Area Networks*)
- b) FANs (*Field Area Networks*)
- c) HANs (*Home Area Networks*)

As duas primeiras são as que encontram aplicação em Redes de Transmissão Inteligentes (STG).

Os parâmetros a considerar na seleção de tecnologias são os seguintes:

- Latência da rede;
- Criticidade da entrega dos dados;
- Confiabilidade;
- Segurança;
- Sincronismo de tempo;
- Suporte a *multicast*;

Com respeito à latência, o IEEE classifica os eventos de intercâmbio de mensagens em várias categorias, e exige que os retardos sejam menores que os especificados na tabela seguinte.

Tipo de informação	Interno à subestação	Externo à subestação
Informações de proteção	4 ms (1/4 do ciclo da onda do sinal elétrico)	8-12 ms
Informações de monitoração e controle	16 ms	1 s
Informações de operação e manutenção	1 s	10 s
Sequências de texto	2 s	10 s
Arquivos de dados processados	10 s	30 s
Arquivos de programas	1 min	10 min
Arquivos de imagens	10 s	1 min
Fluxos de dados de áudio e vídeo	1 s	1 s

TABELA 1: Requisitos de latência para automação de subestações.

A tabela seguinte relaciona os requisitos de latência para os modelos de dispositivos e funções segundo o padrão IEC 61850.

Tipo de mensagem	Definições	Requisitos de retardo
Tipo 1	Mensagens que requerem ações imediatas nos IEDs de destino	1A: 3ms ou 10 ms 1B: 20 ms ou 100 ms
Tipo 2	Mensagens que requerem velocidade de transmissão média	100 ms
Tipo 3	Mensagens para funções de autocontrole de baixa velocidade	500 ms
Tipo 4	Fluxos de dados contínuos dos IEDs	3 ms ou 10 ms
Tipo 5	Transferências de arquivos grandes	1000 ms
Tipo 6	Mensagens de sincronismo de tempo	Não definido
Tipo 7	Mensagens de comando com controle de acesso	Equivalente ao tipo 1 ou ao tipo 3

TABELA 2: Tipos de mensagens IEC 61850 e requisitos de latência.

As tecnologias de rede atualmente disponíveis não foram concebidas com o objetivo de atender aos novos critérios de retardo, conforme detalhadas no padrão IEC 61850-5 "*Communication networks and systems in substations – Part 5: communication requirements for functions and device models*". As experiências realizadas em campo e as simulações realizadas em ambientes de teste no âmbito acadêmico pelos autores deste informe técnico indicam que em muitos cenários típicos de subestações o retardo máximo permitido para os tipos mais críticos de

mensagens é excedido. O retardo medido, segundo o cenário de teste, variou entre 0,2 e 0,7 ms, nos cenários mais favoráveis, e 19 a 622 ms, nos menos favoráveis. Os cenários de teste variaram desde comunicações PC a PC através de conexões diretas Ethernet (um *switch* Ethernet, portas de 100 Mbit/s) até comunicações entre *embedded computers* e PCs via IEEE 802.15.4 e IEEE 820.11g e rede *backbone* de subestação. Os resultados apontaram a retardos menores que 2 ms dentro de uma mesma Ethernet com um só *switch* de alto desempenho, a milissegundos em casos que envolviam redes sem fio e redes com múltiplos saltos.

As simulações realizadas indicaram resultados satisfatório de retardo em redes Ethernet de subestações com barramentos de 100 Mbit/s ou 1 Gbit/s, com um número reduzido de *switches* e distâncias curtas. Outros cenários com maiores distâncias e maior número de *switches* em áreas maiores ainda precisam ser simulados ou testados.

As simulações indicaram que redes Ethernet em subestações, desde que bem planejadas, atendem aos requisitos de retardos de até 3 ms sem problemas. Contudo, redes WiFi não se mostraram adequadas para transportar mensagens de proteção, por exemplo. Por outro lado, redes baseadas em ZigBee e redes sem fio com múltiplos saltos não se mostraram adequadas senão para dados não sensíveis ao tempo; essas redes *não atendem* aos requisitos de mensagens de proteção, monitoração e controle.

Com respeito às redes de longa distância, a adoção de padrões de comunicação que incluam multiplexação TDM pode ser vantajosa e facilitar o projeto das interconexões. Por exemplo, a adoção do padrão OTN torna a rede óptica rápida e flexível, com a possível subdivisão de barramentos ópticos de longa distância de 10 (ou de 40, ou até de 100) Gbit/s em tributários TDM menores (com a utilização de ODU-k de baixa capacidade, como é o caso da adoção de ODU-0 com 1,25 Gbit/s).

Esse enfoque permite, por exemplo, que um anel ou barramento óptico de 10 Gbit/s seja subdividido em 8 sub-barramentos TDM de 1,25 Gbit/s cada um, que não sofrem retardos significativos ao passar pelos OADMs ao longo do barramento. Um único desses sub-barramentos configurados dessa maneira pode atender comutadores de dados de nível 2 ou MPLS ou nível 3 em um número pequeno de subestações de passagem (por exemplo, um barramento Gigabit Ethernet atendendo a duas ou três subestações), limitando assim o número de passagens por comutadores estatísticos. Podem-se criar, inclusive, barramentos TDM ponto a ponto dentro dos anéis, ou, mediante o uso de *cross-conectores* ópticos OTN, criar barramentos TDM em velocidades de múltiplos ODU-0 ($n \times 1,25$ Gbit/s) entre pontos pertencentes a anéis ópticos distintos.

Essa tecnologia combina alta capacidade, flexibilidade de configuração e custo relativamente reduzido com a baixa latência típica de redes TDM, ao mesmo tempo em que permite escolher os pontos interconectados com grande flexibilidade. Alguns barramentos, por exemplo, podem atender a subestações vizinhas para permitir funções de controle e teleproteção diretamente entre elas, ou o envio de dados a concentradores ou processadores de dados de síncrofasores de uma a outra, por exemplo, ou gravadores redundantes remotos de vídeomonitoramento operacional, ao mesmo tempo em que conectam ambas a um ponto central na cabeceira do anel. Na cabeceira do anel, por sua vez, equipamentos *cross-conectores* OTN permitem a interconexão em TDM com outros barramentos do mesmo anel ou de outro anel óptico, e *switches* de camadas 2, MPLS e 3 permitem a interconexão a nível de pacotes com estações em outros barramentos ou anéis.

Também é possível obter resultados semelhantes respectivamente à flexibilidade da configuração e ao retardo, e ainda com maior capacidade, com a adoção de sistemas DWDM em longa distância. Entretanto, as necessidades de comunicação em STGs (redes de transmissão inteligentes) não exigem ainda, necessariamente, a capacidade oferecida pela adoção de interfaces ópticas nos dispositivos interconectados; como os projetos envolvendo o uso de DWDM podem elevar os custos das redes, a solução com OTN pode ser mais vantajosa. Na verdade, é preciso simular os custos, as vantagens e as desvantagens da adoção de uma ou outra tecnologia (ou da superposição de ambas) para cada caso específico de planejamento.

Portanto, o projeto de redes de baixo retardo constitui um problema crucial para aplicações de *smart grid* em transmissão elétrica. O retardo fim a fim pode ser minimizado com a adoção da tecnologia adequada de rede, com a adoção de mapeamento dos serviços da rede (priorização do tráfego crítico), e com a adoção de protocolos mais rápidos (o que pode implicar a modificação e atualização das pilhas de protocolos nos equipamentos da rede, o que pode causar problemas de compatibilidade). Além disso, a adoção de engenharia de tráfego e orientação a conexão (com admissão de conexões) em redes estatísticas pode tornar-se vantajoso.

6.0 - CONCLUSÃO

As redes elétricas inteligentes, no ambiente de produção e transmissão de energia elétrica, trazem consigo novos desafios para o planejamento da infraestrutura de comunicações.

A grande profusão de informações obtidas em campo e que circulam na rede exigem redes de alta capacidade.

As aplicações em tempo real (controle e proteção) se multiplicam com a adoção crescente da medição fasorial.

Nas redes de área de campo (FANs), a adoção de tecnologia Ethernet óptica, com redes planas com poucos saltos em *switches*, revela-se adequada para todas as aplicações de *Smart Grid*. A utilização de redes WiFi (G.802.11g ou melhor) em um dos acessos é adequada para quase todas as aplicações, exceto as mais críticas, desde que não se utilizem redes *multihop*. Os padrões IEEE 802.15, em particular ZigBee, somente são adequados para as aplicações sem restrições quanto à latência. O mesmo se aplica a redes *multihop*. E em todos os casos é preciso a passagem por comutadores em cascata.

Nas redes de longa distância, a adoção de anéis e barramentos ópticos com tecnologia TDM baseada em OTN permite construir redes de custo relativamente reduzido, com alta capacidade, alta flexibilidade e baixa latência. Outra alternativa é realizar redes em DWDM, mas seu custo ainda pode ser elevado e sua capacidade é maior do que aquela demandada pela *Smart Grid*. Entretanto, pode ser uma opção interessante e sua adoção deve ser avaliada na etapa de planejamento e seleção de tecnologias.

Para evitar retardos longos, convém evitar nas redes WAN um número elevado de saltos por comutadores de nível 2, MPLS ou nível 3, o que torna vantajosa a adoção de enlaces diretos ponto a ponto ou ponto a multiponto em comprimento de onda (redes DWDM) ou portadoras TDM (ODU-k em redes OTN).

Em todos os casos, a elaboração de um cuidadoso Plano Diretor de Comunicações, levando em conta as experiências em ambientes reais de outras empresas e simulações, é de extrema importância para o êxito da evolução a redes elétricas inteligentes.

A simulação de tráfego e o teste das aplicações em ambiente simulado pode constituir uma ferramenta de grande valia para o planejamento da evolução da infraestrutura de telecomunicações, e pode ser levada a cabo em cooperação com os centros de pesquisa das grandes universidades brasileiras

7.0 - BIBLIOGRAFIA

1. PEDRO HENRIQUE V. GUIMARÃES, ANDRÉS MURILLO, MARTIN ANDREONI, DIOGO M. F. MATTOS, LYN HENRIQUE G. FERRAZ, FABIO ANTONIO V. PINTO, LUÍS HENRIQUE M. K. COSTA E OTTO CARLOS M. B. DUARTE. *Comunicação em Redes Elétricas Inteligentes: Eficiência, Confiabilidade, Segurança e Escalabilidade*; GTA/PÉE-COPPE/DEL-Poli - Universidade Federal do Rio de Janeiro - RJ, Brasil, 2014.
2. WENYE WANG, YI XU, MOHIT KHANNA. *A Survey On The Communication Architectures In Smart Grid*; Elsevier Computer Networks 55, 2011.
3. ANJAN BOSE. *Evolution of Control for Smart Transmission*; Washington State University / Lehigh University, 2012.
4. PRASHANT KANSAL, YANNAN WANG, PRADEEP YEMULA, ANJAN BOSE. *Communication Architecture for Wide-Area Control and Protection of the Smart Grid*; Washington State University / PSERC Future Grid Initiative, 2013.
5. VÁRIOS AUTORES. *Jumpstarting a Modern Grid*; U.S. Department of Energy, Office of Electricity Delivery and Energy Reliability, 2014.
6. STEPHEN F. BUSH. *Smart Grid: Communication-Enabled Intelligence for the Electric Power Grid*; John Wiley & Sons, 2014.
7. LUIGI VANFRETTI & JOE H. CHOW. *Synchrophasor Data Applications for Wide-Area Systems*; Royal Institute of Technology (KTH), Suécia, e Rensselaer Polytechnic Institute (RPI), E.U.A..
8. XINXIN FAN AND GUANG GONG. *Security Challenges in Smart-Grid Metering and Control Systems*; Technology Innovation Management Review, maio de 2015.
9. CISCO SYSTEMS. *Cisco Smart Grid Security Solutions Brief*; Cisco Systems, Inc., 2009.
10. EVGENY LEBANIDZE. *Guide to Developing a Cyber Security and Risk Mitigation Plan*; The National Rural Electric Cooperative Association's Cooperative Research Network.
11. THE SMART GRID INTEROPERABILITY PANEL CYBER SECURITY WORKING GROUP. *Introduction to NISTIR 7628 Guidelines for Smart Grid Cyber Security*; SGIP, 2010.
12. MAHENDRA PATEL et al. *Real-Time Application of Synchrophasors for Improving Reliability*; NERC, 2010.
13. YOGESH SIMMHAN, ALOK GAUTAM KUMBHARE, BAOHUA CAO, e VIKTOR PRASANNA. *An Analysis of Security and Privacy Issues in Smart Grid Software Architectures on Clouds*; trabalho patrocinado pelo Department of Energy, E.U.A., 2012.
14. STEPHEN SPOONAMORE e RONALD L. KRUTZ, Ph.D., PE, CISSP, ISSEP. *National Security Risks and Concerns of Smart Grid*.

8.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Cristiano Henrique Ferraz, Engenheiro de Telecomunicações formado pela Universidade Federal Fluminense em 1978. Atuou como engenheiro de desenvolvimento na sede da Wandel & Goltermann (Alemanha) até 1985, e a suas atividades técnico-docentes acrescentou a posição de gerente regional para a área norte da América Latina no período de 1986-1989. Desde maio de 2010, atua como consultor sênior da empresa Netcon Ltda – Engineering Excellence, presente no Brasil e nos demais países da América Latina. A Netcon é dedicada a soluções de engenharia e consultoria sobre as mais recentes tecnologias utilizadas em telecomunicações e sobre a operação comercial de serviços de telecomunicações. O engenheiro Ferraz tem atuado como professor convidado dos cursos de pós-graduação e MBA em telecomunicações e extensão de várias universidades latino-americanas. Entre outras atividades, atuou como consultor junto à Petrobras e à Chesf, e criou e ministrou cursos de atualização para várias empresas do continente. Em tempos recentes, o engenheiro Ferraz vem-se dedicando, principalmente, às novas tecnologias de redes ópticas e à estruturação da operação comercial de serviços de telecomunicações para utilities. Ele é coautor de livros sobre Ethernet e Carrier Ethernet a serem publicados em breve no Brasil pela Editora Ciência Moderna.



Lyno Henrique Gonçalves Ferraz, Engenheiro de Eletrônica e de Computação graduado pela Universidade Federal do Rio de Janeiro no ano de 2010. Recebeu o título de Mestre em Engenharia Elétrica em Redes de Computadores no GTA/PEE/COPPE em 2011. Trabalhou em desenvolvimento de *software* de monitoração de redes de dados na empresa ISPM, no Rio de Janeiro. Sua experiência no ramo acadêmico inclui trabalhos sobre redes *ad hoc*, avaliação virtual de desempenho de redes de dados de novas arquiteturas, protocolo HIP para provisão de mobilidade na Internet e arquiteturas de redes de dados flexíveis de teste. No momento, dedica-se em tempo integral ao curso de doutorado em Redes de Computadores no COPPE/PEE/GTA, em convênio com o *Institute Pierre et Marie Curie*, Sorbonne Universités, em Paris, onde se encontra vivendo atualmente. Suas atividades atuais incluem o desenvolvimento de trabalhos de pesquisa e simulação na área de comunicação de centros de dados, redes virtuais e computação em nuvem.



André Camargo Langrafe, formado em Tecnologia em Redes de Computadores pela UNICID/SP em 2011. Atualmente desenvolve na empresa Netcon, a função de coordenador de implantação de sistema de inventário e documentação de redes de telecomunicações, para médias e grandes operadoras e provedores de Internet. André possui grande experiência no planejamento e implantação de redes FTTH, possuindo as certificações do FTTH Council e também atua em projetos de consultoria na área de planejamento de sincronismo de redes.