

Análise de uma rede Smart Grid usando a norma IEC 61850 e dados de medições

Fernando Petenel e Cristiano Panazio

Resumo—Este artigo apresenta uma análise de uma rede *Smart Grid* baseada na norma IEC 61850 e em dados obtidos a partir de medições de parâmetros de equipamentos utilizados na área. O objetivo é explorar os limites operativos da rede, *i.e.*, determinar a latência e casos de congestionamento que afetem a confiabilidade da mesma, através de diferentes cenários encontrados na prática.

Palavras-Chave—IEC 61850, *Smart Grid*, GOOSE, NS2.

Abstract—This article presents an analysis of a *Smart Grid* network based on IEC 61850 standard and the data obtained through measurements of parameters from equipments used in such network. The main objective is to explore the operational limits of the network, *i.e.*, determine the latency and congestion scenarios that affect the reliability of such network, through different and practical scenarios.

Keywords—IEC 61850, *Smart Grid*, GOOSE, NS2.

I. INTRODUÇÃO

Para que os sistemas de fornecimento de energia elétrica possam atender à demanda crescente dos próximos anos, é necessário que, além do aumento de geração, sejam empregados métodos para otimizar o consumo e a distribuição de energia. Com esse intuito, surge a idéia de criar redes inteligentes chamadas *Smart Grid*.

O termo *Smart Grid* é utilizado para denominar uma rede elétrica com comunicação digital, formada por uma variedade de tecnologias, cuja finalidade é integrar sistemas de automação, melhorar o aproveitamento dos sistemas elétricos de potência e prover suporte a novas aplicações. Para viabilizar esta tecnologia, são necessários amplos esforços na área de telecomunicações.

No contexto destas redes, é necessário que sejam criadas normas que contemplem aspectos técnicos e políticos para integração dos sistemas. Analisando o histórico do desenvolvimento dos sistemas elétricos de potência, é possível perceber que a definição de arquiteturas e normatização sempre foi alvo de intensos debates (*e.g.*, [1]). Todavia, a normatização é fundamental para que a interoperabilidade possa ocorrer, além de facilitar a escalabilidade. Em outras palavras, fabricantes de produtos, concessionárias de energia e consumidores devem entrar em acordo na estratégia e

tecnologia de implantação destas redes.

Tendo em vista tal questão, o padrão IEC 61850 foi criado com foco na comunicação em redes e sistemas de subestações [6]. Tal padrão visa a criação de um barramento de dados comum integrando a comunicação de dispositivos tais como disjuntores e dispositivos eletrônicos inteligentes (IEDs – *Intelligent Electrical Devices*), até sistemas de supervisão e controle.

A grande vantagem por trás deste padrão se deve ao fato de permitir a redução de custos no projeto e instalação de sistemas de proteção. Esta redução de custos se deve a diversos fatores. Entre eles, a comunicação neste padrão é feita unicamente através de interfaces do tipo Ethernet (IEEE 802.3), fato que por si só reflete diretamente no momento da concepção do projeto dos painéis de proteção, reduzindo de forma significativa a necessidade de cabeamento, e tornando o desenvolvimento de lógicas de controle e automação mais simples de serem criadas em IEDs. Além destes fatores, é importante destacar também que a adoção da Ethernet facilita a interoperabilidade de dispositivos de diferentes fabricantes, bem como permite a simples adição de novos dispositivos no sistema.

Em sistemas do tipo *Smart Grid*, a utilização de uma nova geração de relés de proteção é de fundamental importância. Estes dispositivos permitem a implementação de lógicas flexíveis, esquemas avançados de proteção, e, fundamentalmente, integrar diversas funções de proteção em um único dispositivo [3]. O aumento no uso deste tipo de relés fez também crescer a demanda pelo uso de comunicação, incluindo a comunicação entre relé e central supervisória, entre relé e outros equipamentos de subestações e entre relés. Nota-se então o porquê da necessidade do padrão IEC 61850.

No topo das redes de subestações estão os sistemas de automação de subestações (SAS – *Substation Automation Systems*) que permitem realizar funções de automação para monitoramento, controle e proteção. A aplicação de SAS em subestações começou em meados dos anos 1980 e, desde então, vem aumentando para: i) atender aos requisitos do mercado, visando a queda nos custos totais; ii) permitir uma operação altamente efetiva próxima dos limites suportados pelos equipamentos utilizados na subestação; iii) otimizar os custos de manutenção [4]. A partir da década de 1990, os fabricantes destes sistemas começaram a utilizar padrões Ethernet, os protocolos TCP/IP e métodos proprietários para comunicação. As funções básicas de um SAS podem ser classificadas em monitoramento, controle, registros e proteção.

É neste contexto que este trabalho visa fazer uma simulação de um SAS, utilizando o protocolo IEC 61850 e parâmetros obtidos com testes reais com IEDs, de modo a explorar os

Fernando Petenel, ABB e Laboratório de Comunicações e Sinais (LCS) – Departamento PTC – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP), Brasil; Cristiano Panazio, Laboratório de Comunicações e Sinais (LCS) – Departamento PTC – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP), Brasil, E-mails: {fpetenel,cpanazio}@lcs.poli.usp.br

limites operativos da estrutura de comunicação. Em outras palavras, tal simulação permite determinar, em certas situações, os limites de operação do sistema em termos de latência e confiabilidade no transporte de informação em função do dimensionamento, *i.e.*, do número dispositivos que nela operam.

Este artigo está organizado como se segue. Na seção II é apresentada uma visão geral da norma IEC 61850 e suas partes. Em seguida, na seção III, o modelo do sistema é descrito e discute-se o problema tratado. Já a seção IV apresenta os resultados da simulação, e finalmente, a seção V, encerra o artigo com a conclusão do mesmo.

II. VISÃO GERAL DA NORMA IEC 61850

A norma IEC 61850 está dividida em dez partes [2] como descrito na Tabela I.

TABELA I. NORMA IEC 61850 E SUAS PARTES

Partes	Descrição
1	Introdução e visão geral
2	Glossário
3	Requisitos gerais
4	Gerenciamento de sistema e projeto
5	Requisitos de comunicação para modelos de funções e dispositivos
6	Linguagem de descrição de configuração para comunicação em Subestações relacionada a IEDs
7	Estrutura básica de comunicação para Subestação e equipamentos de alimentadores (Subdivido em 4 partes)
8	Mapa de serviços de comunicação específicos (MMS - Manufacturing Message Specification)
9	Mapa de serviços de comunicação específicos (Valores amostrados)
10	Testes de conformidade

As principais partes da norma, dado o interesse desta simulação, vão de 6 a 10 e definem o protocolo de comunicação.

Em uma rede IEC 61850 existem basicamente dois tipos de pacotes trafegando. O primeiro tipo de pacote, chamado de GOOSE, é voltado à comunicação horizontal, ou seja, a comunicação entre dispositivos que estão em um mesmo nível como, por exemplo, dois IEDs. O outro tipo de pacote é chamado de MMS (*Multimedia Messaging System*) que faz a comunicação vertical, ou seja, a comunicação entre o sistema supervisor e um IED, requisitando informações através de pacotes TCP (*Transmission Control Protocol*). No caso de pacotes GOOSE, as informações são transmitidas a todos os dispositivos pertencentes a um mesmo grupo de rede através de UDP (*User Datagram Protocol*).

Para garantir a interoperabilidade de mensagens GOOSE entre dispositivos de diferentes fabricantes são necessários testes de conformidade que atestem que os dispositivos obedecem não somente a aspectos funcionais, mas também a determinados níveis de desempenho. A parte 10 da norma IEC 61850 define testes de conformidade para os aspectos funcionais e desempenho. No caso dos requisitos mínimos de desempenhos, existem duas classes distintas para classificação do desempenho de sinais de proteção e controle. A primeira classe chamada de P1 se aplica a sistemas de distribuição, em que requisitos de desempenho mais baixos podem ser aceitos. A segunda classe chamada de P2/3 se aplica a sistemas de transmissão quando requisitos mais altos de desempenho são necessários. Para estas classes são definidos tempos máximos de transmissão de mensagens chamados de tempo de transferência. De acordo com [2], este tempo é contabilizado desde o momento em que o dispositivo que está enviando a mensagem inclui os dados no topo de sua pilha de transmissão, até o momento em que o receptor extrai estes dados da sua respectiva pilha. As mensagens por sua vez também são classificadas em diferentes tipos sendo que, para cada tipo, diferentes tempos de transmissão são definidos. O tipo mais crítico de mensagem é chamado de tipo 1A, que é a mensagem que transporta os sinais de disparo (*trip*) das funções de proteção. Esta é a mensagem mais importante em uma subestação. Para este tipo de mensagens o tempo definido para classe P1 é de 10ms, tempo de meio ciclo para sistemas com frequência nominal de 50Hz, e para classe P2/3 é de 3ms, inferior a um quarto de ciclo de 50Hz.

III. MODELO DO SISTEMA E MOTIVAÇÃO PARA O PROBLEMA TRATADO

A estrutura típica de um SAS é apresentada na Figura 1. Esta estrutura serve como base para justificar as situações que foram simuladas.

Além da estrutura de comunicação, é necessário tomar como base também um diagrama unifilar simplificado de uma subestação, como forma de representar as estruturas mais significativas. A Figura 2 apresenta o diagrama unifilar em questão.

Ocorre que muitas vezes no momento da especificação do projeto de uma subestação, o cliente se preocupa com o desempenho do sistema de comunicação em situações extremas, ou seja, sempre surge dúvida em relação aos limites operativos da estrutura de rede a ser implementada no SAS da subestação.

As dúvidas mais comuns são com relação ao número máximo de mensagens que podem ser trocadas pelos IEDs sem comprometer significativamente o tempo de resposta da rede, a confiabilidade no transporte de pacotes, ou seja, a taxa de perda de pacotes, e a quantidade de informação que é trafegada na rede durante um evento tal como um curto circuito.

Algumas aplicações, como é o caso de sistemas de descarte de cargas (*load shedding*), requerem tráfego constante de pacotes GOOSE contendo informações de corrente, tensão e potência. Nestas aplicações, o intervalo em que o tráfego destas informações deve ocorrer é muito pequeno, da ordem de alguns milissegundos. Isto permite que o sistema possa analisar variações no carregamento do sistema e tomar ações para mitigar estes distúrbios de forma suficientemente rápida, e

evitar o colapso da rede. Assim sendo, esta é uma situação a ser explorada nas simulações.

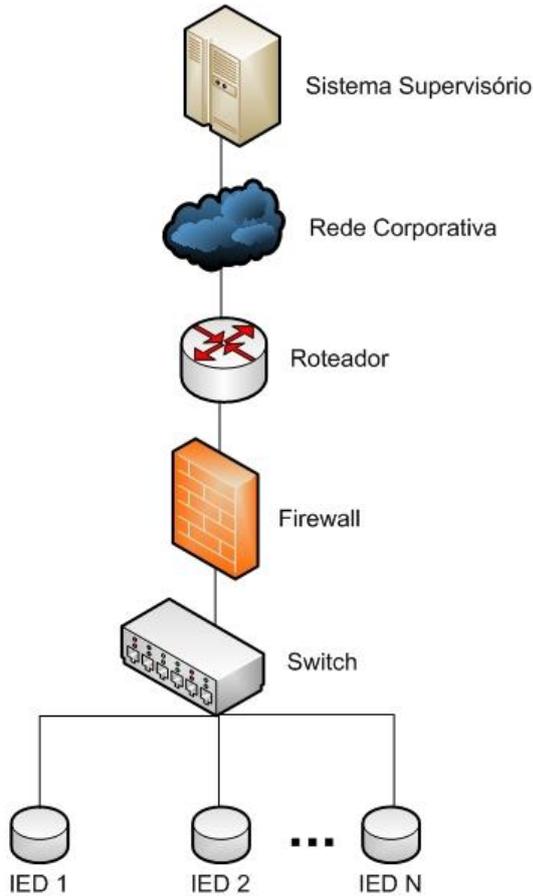


Fig. 1. Estrutura típica de um SAS.

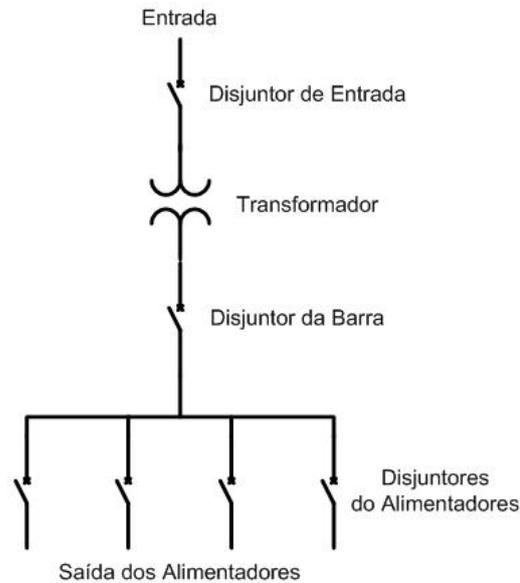


Fig. 2. Diagrama unifilar simplificado.

Complementando esta análise, é verificada também uma situação corriqueira de curto circuito. Durante tal condição, sinais GOOSE podem ser enviados para realizar esquemas de seletividade lógica ou até mesmo para garantir a extinção da falta no caso de uma falha de disjuntor. Entretanto, para

simular o pior caso possível, é assumida uma condição onde todos os IEDs de proteção estão detectando curto circuitos independentes, porém, que ocorrem no mesmo instante.

IV. AVALIAÇÃO DO SISTEMA ESTUDADO

Para realizar a simulação proposta neste trabalho, foi utilizado o software Network Simulator (NS-2), e para simular o tráfego de dados de um sistema SAS, foi criada uma estrutura de rede similar à descrita na Figura 3.

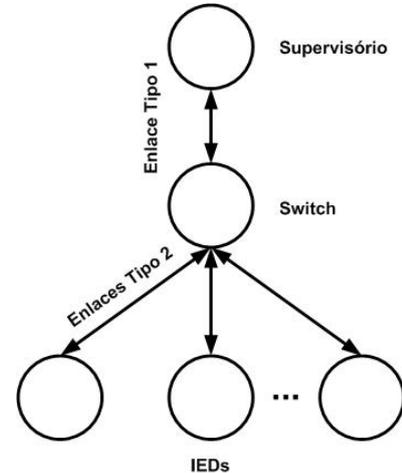


Fig. 3. Topologia da simulação

Os enlaces utilizados na simulação foram divididos em dois tipos. O primeiro enlace faz a interligação entre o supervisorio e o switch, enquanto que o enlace do tipo 2 faz a interligação entre o switch e os IEDs. Os enlaces possuem uma capacidade de transmissão de dados de 100 Mbps *full duplex*. O tempo de latência dos enlaces é calculado como descrito em [5] e varia de acordo com o número de IEDs e tamanho dos pacotes. Nesta simulação, o supervisorio requisita informações aos IEDs, simulando uma troca de mensagens MMS através de pacotes do tipo TCP, e os IEDs, por sua vez, realizam o *multicast* de pacotes GOOSE a todos os dispositivos conectados ao switch com exceção do supervisorio, que se encontra em outro grupo de rede. O tempo de simulação total utilizado foi de 0,5s sendo que o início do tráfego ocorre após 0,1s do início da simulação.

Para tornar a simulação compatível com uma situação real foram utilizados dados obtidos através de testes realizados em fevereiro de 2012 no laboratório de relés de média tensão da ABB Brasil, baseada em uma estrutura típica de um SAS, de acordo com a topologia descrita na Figura 3. Contudo, nestes testes, foram utilizados apenas 2 IEDs e um computador para simular o sistema supervisorio e poder realizar as medições de tráfego na rede. Nos testes efetuados, o tamanho do maior dos pacotes medidos foi de 160 bytes para pacotes GOOSE contendo valores de potência e 156 bytes para pacotes GOOSE que transportam sinal de *trip* de proteção. Como este último sinal tem uma frequência de envio muito menor que os valores de potência em sistemas de descarte de cargas, decidi-se por fixar todos os pacotes em 160 bytes nas simulações. Para pacotes MMS o tamanho do maior pacote medido foi de 159 bytes com exceção de pacotes de *keep alive* utilizados para monitorar a conectividade do dispositivo na rede, com tamanho de 40 bytes e intervalo entre transferências na ordem de segundos. Para simular o pior caso possível, foi utilizado um tamanho de 160 bytes também para os pacotes MMS e, dada a

duraco de 0,5s da simulacão, o envio de pacotes de *keep alive* foi ignorado. O tamanho dos pacotes pode variar de acordo com o valor da variável de informaco a ser transportada. Contudo esta variao não  siginificativa se comparada ao tamanho total do pacote, o que não influencia diretamente nos resultados da simulacão.

O primeiro resultado obtido através da simulacão foi a taxa de transferência de dados para situaes de tráfego de pacotes GOOSE com intervalo entre transmissões de 1ms, 10ms, 100ms e 1s simulando a situao de descarte de cargas para 10, 40, 90, 150 e 300 IEDs de acordo com a Figura 4. A partir desta figura,  possível notar que, para intervalos de transferência de pacotes GOOSE iguais ou superiores a 10ms, a capacidade de transferência de dados do enlace  suficiente para dar vazão aos dados gerados para todos os números de IEDs simulados. Entretanto, no caso de utilizar um intervalo de transferência de dados de 1ms e 90 IEDs, a capacidade do enlace  atingida.

Para simulacão do tráfego de dados entre IEDs e supervisório foi utilizado um modelo de fila M/M/1 com característica de um processo de Poisson e média de chegada de 8 pacotes (3 correntes de fase, 1 corrente residual, 3 tensões de fase e 1 tensão residual) por ciclo (60Hz). Este tráfego de pacotes MMS foi utilizado em todas as simulaces cujos resultados são apresentados a seguir, mantendo os parâmetros descritos como fixos. Os pacotes GOOSE não são representados com o modelo M/M/1 e são enviados considerando a situao operacional da simulacão – ocorrência de um evento de curto circuito e envio de dados de potência para descarte de cargas – e característica da norma IEC 61850 que estabelece retransmissões em tempos definidos (*heartbeats*). Além disso, pacotes GOOSE são transmitidos por *multicast*, diferentemente dos pacotes MMS que foram modelados por M/M/1, pois neste caso, os clientes são homogneos. Em outras palavras, possuem o mesmo tempo de serviço e o mesmo tamanho de pacotes.

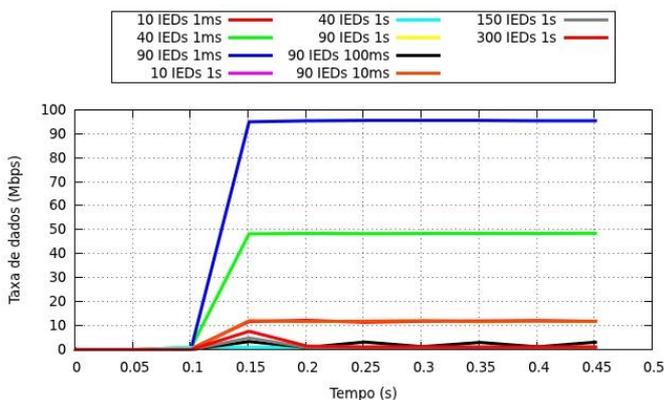


Fig. 4. Taxa de transferência monitorada nos enlaces dos IEDs.

Através dos dados obtidos, foi monitorado também o número de pacotes na fila para a situao crítica em que o intervalo entre o envio de pacotes GOOSE  de 1ms como mostra a Figura 5. Nela,  possível notar que para a situao em que foram utilizados 90 IEDs, o número de pacotes na fila segue uma característica linear e crescente, o que resultará no preenchimento da capacidade do buffer do *switch* e, conseqüentemente, levará ao descarte de pacotes. A ocorrência deste fato resultaria na perda de confiabilidade do sistema, fazendo com que informaes críticas pudessem ser ignoradas como na ocorrência de uma falta. Para os casos simulados com 10 e 40 IEDs, o número de pacotes na fila permanece nulo,

pois a capacidade de transmissão de dados  maior do que o fluxo de dados gerado.

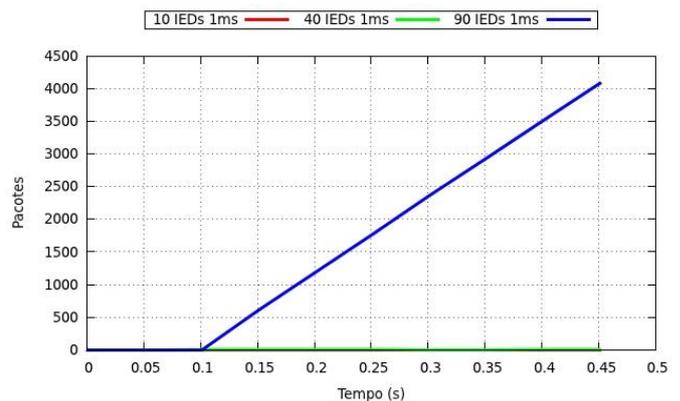


Fig. 5. Pacotes na fila.

Outra situao avaliada diz respeito ao tempo de latência dos pacotes como mostrado na Figura 6. Nesta simulacão, a situao com 90 IEDs  descartada, pois, neste caso, a capacidade de transferência de dados do enlace  atingida e os pacotes são armazenados na fila, resultando em um tempo de latência com característica crescente. Através dos resultados apresentados nesta figura,  possível verificar que o tempo de latência máximo verificado fica em torno de 1,6 ms. Este valor atende aos requisitos mais exigentes da norma IEC 61850 utilizado para pacotes do tipo 1A para a classe P2/3, que  de 3ms considerando o tempo total de transferência do sinal e o tempo de empilhamento e desempilhamento da informao no buffer dos dispositivos.

Normalmente, em redes IEC 61850 são utilizados *switches* que possuem a capacidade de gerenciar a qualidade de serviço (QoS – IEEE 802.1p) e criar *virtual lans* (VLAN – IEEE 802.1Q). Estes recursos podem ser utilizados para dar prioridade a determinados tipos de pacotes, no caso pacotes GOOSE, fazendo com que estes tipos tenham prioridade de envio e recebimento em detrimento de outros. No entanto, como o intuito desta simulacão  avaliar a pior situao possível para os pacotes GOOSE – que possuem tempos máximos de transferência definidos em norma – o recurso de QoS não foi utilizado.

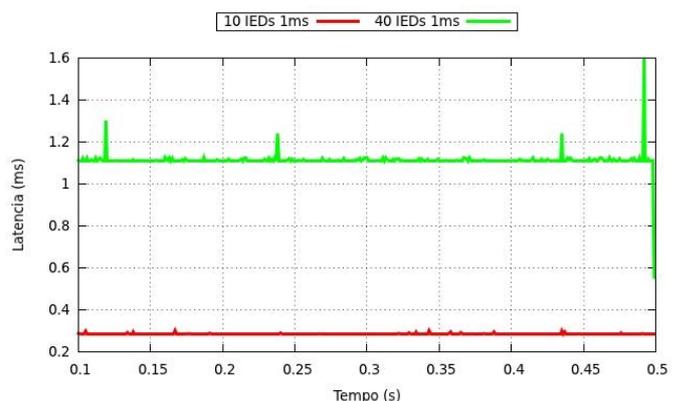


Fig. 6. Comparaco de latência de pacotes.

O tráfego gerado por pacotes MMS  muito menor do que o tráfego de pacotes GOOSE durante a simulacão, devido principalmente  característica de transmissão *unicast* e também ao intervalo entre o envio de pacotes ser maior,

próximo de 16,7 ms. Considerando a taxa de transmissão dos enlaces de 100 Mbps e que são gerados 8 pacotes por IED a cada intervalo, é possível verificar que o número esperado de pacotes em uma fila M/M/1 nestas condições é próximo de zero.

V. CONCLUSÕES

A partir das situações simuladas, foi possível explorar alguns limites de um SAS para dois tipos de aplicações: i) demanda de fluxo de dados intenso e; ii) demanda de transferência de pacotes em intervalos maiores. Para as aplicações que demandam um fluxo maior de dados, foi possível verificar que, para um número próximo de 90 IEDs, a capacidade de transmissão da rede foi saturada. Consequentemente, neste caso, seria ideal utilizar menos IEDs para que o tempo de latência não aumente significativamente, prejudicando aplicações críticas. Contudo, nestes casos, geralmente são empregadas outras formas de conectar os dispositivos. Uma delas seria dividir os IEDs em grupos de rede privadas, fazendo com que os pacotes GOOSE sejam transmitidos via *multicast* a um número menor de dispositivos.

No caso de aplicações em que o intervalo entre transmissões é maior, como no caso da ocorrência de um curto circuito, ou mesmo a troca de sinais de estado de dispositivos, o número de IEDs que pode ser utilizado, mantendo a confiabilidade do sistema, é superior a 300 IEDs, o que certamente atende a todos os tipos de subestações.

Dados os resultados obtidos, é possível concluir que a norma IEC 61850 pode atender satisfatoriamente a aplicações de redes *smart grid*. Esta norma, assim como alguns outros protocolos de comunicação já amplamente utilizados, tem sido apontada como potencial a ser utilizada nestas redes. Cada tecnologia de comunicação possui seus prós e contras, mas uma coisa é certa, nenhuma solução será capaz de atender de forma ótima a todos os tipos de ambientes presentes no sistema elétrico. Por este motivo, a comunicação em redes inteligentes certamente será composta por diversos protocolos e interfaces, criando um sistema de comunicação híbrido.

REFERÊNCIAS

- [1] Tesla – Life and Legacy. “War of the currents”. Disponível online em http://www.pbs.org/tesla/ll/ll_warcur.html. Acessado em Março de 2012.
- [2] “IEC 61850” International Electrotechnical Commission, Switzerland, 2008.
- [3] Gary Leishman ; Manish Thakur. “Standardization of Distribution Protection System Based on the New Generation of Microprocessor Relays”.
- [4] I. Mitani et al., “Application of Coordinated Control, Protection and Operation Support System in EHV Substaions” CIGRE 34-105 1996.
- [5] Ruggedcom. “Latency on a Switched Ethernet Network”. Disponível online em http://www.ruggedcom.com/pdfs/application_notes/latency_on_a_switched_ethernet_network.pdf. Acessado em Março de 2012.
- [6] T. S. Sidhu et al., “Packet Scheduling of GOOSE Messages in IEC 61850 based Substation Intelligent Electronic Devices (IEDs)”. Power and Energy Society General Meeting, 2010. IEEE