



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO MESQUITA FILHO”
Campus de Ilha Solteira

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA
CAMPUS ILHA SOLTEIRA

**Estudo da Comunicação de um Compensador Série para
Rede de Distribuição com o Centro de Controle Utilizando
Tecnologia GPRS**

Esleyra Guerrero Maldonado

Ilha Solteira – SP

Setembro – 2013



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“ JÚLIO MESQUITA FILHO”
Campus de Ilha Solteira

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**“Estudo da Comunicação de um Compensador Série para
Rede de Distribuição com o Centro de Controle Utilizando
Tecnologia GPRS”**

Esleyra Guerrero Maldonado

Orientador: Prof. Dr. Dionízio Paschoareli Júnior

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia – UNESP – Campus de Ilha Solteira, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de Conhecimento: Automação.

Ilha Solteira – SP

Setembro – 2013

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

M244e Guerrero Maldonado, Esleyra.
Estudo da comunicação de um compensador série para rede de distribuição com o centro de controle utilizando tecnologia GPRS / Esleyra Guerrero Maldonado. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2013
98 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Automação, 2013

Orientador: Dionízio Paschoareli Júnior
Inclui bibliografia

1. Distribuição de energia. 2. Redes inteligentes. 3. Smart grids. 4. Smart metering. 5. Comunicação em redes inteligentes.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: Estudo da Comunicação de um Compensador Série para Rede de Distribuição com o Centro de Controle Utilizando Tecnologia GPRS

AUTORA: ESLEYRA GUERRERO MALDONADO

ORIENTADOR: Prof. Dr. DIONIZIO PASCHOARELI JUNIOR

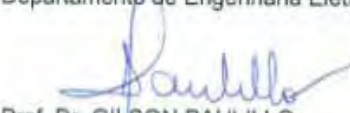
Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica ,
Área: AUTOMAÇÃO, pela Comissão Examinadora:



Prof. Dr. DIONIZIO PASCHOARELI JUNIOR
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira



Prof. Dr. AILTON AKIRA SHINODA
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira



Prof. Dr. GILSON PAULILLO
Instituto de Pesquisas Eldorado

Data da realização: 19 de setembro de 2013.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho ao meu
Papai Enrique, as minhas Mamães Dora
Alicia e Aurora, e asminhas irmãs Erandy e Evelyn

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por dar a força, persistência, e sabedoria necessária para não desistir e realizar este trabalho.

Agradeço aos meus Pais e a minha família, por todo o apoio incondicional, que têm me dado durante toda minha vida e por sempre terem acreditado em mim.

Agradeço ao Andrés por estar comigo quando mais eu necessitava de ele para cumprir cada um de meus objetivos e por acreditar em mim.

Quero expressar meus mais sinceros agradecimentos ao Prof. Dr. Dionizio Paschoareli Junior, pela sua orientação, dedicação, confiança, paciência e amizade durante o desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço aos professores de Pós-graduação em Engenharia Elétrica da UNESP de Ilha Solteira, pela sua dedicação na transmissão do conhecimento.

Também quero agradecer a meus amigos Lucas, Leonardo, Alberto e Patrick pelos bons momentos compartilhados, amizade e ajuda.

Finalmente, agradeço ao Instituto Tecnológico Superior de Poza Rica, Elektro e CAPES pelo apoio financeiro no desenvolvimento deste trabalho.

RESUMO

Atualmente, a tecnologia da compensação que utiliza controladores eletrônicos para a flexibilização dos sistemas (controladores FACTS) provê recursos aos sistemas de transmissão de energia elétrica que permitem o controle dinâmico do fluxo de energia desde a geração até o consumo. Para que se torne factível o uso de FACTS no sistema de distribuição, faz-se necessária a implantação de um sistema de comunicação para o monitoramento em tempo real de toda grade de energia até o centro de controle. Com o controle dinâmico e o monitoramento dos diversos equipamentos distribuídos no sistema de energia, tem-se o conceito das Redes Inteligentes ou *Smart Grids* (SG). Através deste conceito, as tecnologias de informação e comunicação (TIC) terão um papel relevante em todas as fases do ciclo de geração, transporte, comercialização e consumo. A realidade da SG deve transformar o sistema elétrico. Nesse sentido, este trabalho propõe, através da análise teórica, uma solução para comunicação entre o compensador série controlado a tiristores para rede de distribuição (D-TCSC), localizado em uma rede de distribuição na zona rural, com o centro de controle, localizado a centenas de quilômetros de distância. A tecnologia sugerida, de acordo com as características do estudo de caso, foi a GPRS. A sugestão foi feita analisando a relação entre a quantidade de dados a ser transmitida e o tempo de transmissão. Os resultados das análises mostram que a utilização de a tecnologia GPRS, para efetuar a comunicação em aplicações de teleproteção, é factível. Entretanto, para alcançar melhor desempenho, sugere-se a utilização das tecnologias 3G e 4G, quando estas oferecerem cobertura de sinal para ambientes remotos.

Palavras-chaves: D-FACTS. Redes inteligentes. GPRS. Redes de distribuição. Compensador série.

ABSTRACT

Nowadays, FACTS controllers are very important for allowing dynamic control of power flow from generation to consumption. The use of FACTS controllers in distribution systems has become more feasible with the implementation of communication system for real-time monitoring. The dynamic control and monitoring of several equipment in distributed power system has arisen the Smart Grids concept. Through this concept, the information and communication technologies (ICT) have important role in all stages of generation, transportation, marketing and consumption. The SG shall transform the electrical system. This work proposes, through theoretical analysis, the communication between a thyristor-controlled series compensator, located in a distribution network in the countryside, with the control center, located several hundred kilometers away. The suggested technology, according to the characteristics of the study case, was the GPRS. The suggestion was based on the ratio among the distance, the amount of data to be transmitted and the transmission time. The analysis results show that the use of the GPRS-technology to provide communication in a SG is suitable.

Words-keys: D- FACTS. Smart grids. GPRS. Cellular networks. Series compensator. Distribution systems.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	- Dispositivo FACTS conectado em derivação	20
Figura 2	- Curva PV- Dispositivos SVC	20
Figura 3	- Dispositivo FACTS conectado em série	20
Figura 4	- Capacitor série chaveado a tiristor (TSSC)	22
Figura 5	- Capacitor shunt chaveado a tiristor (TSC)	23
Figura 6	- Transformador desfasado com tap chaveado a tiristor	23
Figura 7	- Compensador série controlado a tiristor (TCSC)	24
Figura 8	- Compensador estático de reativo convencional (SVC)	24
Figura 9	- Compensador avançado de reativos (STATCOM)	25
Figura 10	- Controlador unificado de fluxo de potência(UPFC)	25
Figura 11	- Sistema de transmissão de duas barras	28
Figura 12	- Fluxo de potência ativa com e sem compensação	29
Figura 13	- Diagrama do circuito utilizado no exemplo	32
Figura 14	- Perfil de tensão e diagrama de impedâncias de um circuito de distribuição com o início de um motor de indução	32
Figura 15	- Diagrama fasorial da redução do requerimento de potência reativa por fase	33
Figura 16	- Gráficos típicos que mostram a redução das flutuações de tensão (a) Sem capacitor série (b) Com capacitor série	34
Figura 17	- Melhoria da divisão de corrente entre circuitos paralelos, por meio de compensação série	34
Figura 18	- Infraestrutura de comunicação	39
Figura 19	- Interoperabilidade entre domínios de <i>smart grid</i>	40
Figura 20	- Hierarquias das redes HAN, NAN e WAN	41
Figura 21	- Elementos da rede HAN	42
Figura 22	- Tecnologia GPRS	49
Figura 23	- Disposição típica de RTUs e IEDs em aplicação SCADA	51
Figura 24	- Modelo EPA	53
Figura 25	- Modelo OSI	56

Figura 26	- Padrões mais utilizados	57
Figura 27	- Representação da comunicação do DNP3	59
Figura 28	- Topologias do DNP3	62
Figura 29	- Modelo DNP3	63
Figura 30	- Formato de Segmento	64
Figura 31	- Transmissão de dados mestre/escravo	65
Figura 32	- Formato dos quadros finais	66
Figura 33	- Comunicação entre dispositivos mestres e <i>outstation</i>	67
Figura 34	- Mensagem do usuário	67
Figura 35	- Diagrama das partes de um sistema SCADA	69
Figura 36	- Transmissão	70
Figura 37	- Comunicação é realizada através de GPRS	75
Figura 38	- Distâncias em km e transmissão de dados do estudo	81
Figura 39	- Diagrama de funcionamento do transformador de medição encapsulado	82
Figura 40	- Topologia de aquisição de dados e envio ao modem	85
Figura 41	- Comunicação entre D-TCSC e a rede GPRS	85
Figura 42	- Encapsulamento do datagrama DNP3 no cenário proposto	86

LISTA DE QUADROS

Quadro 1	- Tipos de tecnologias	47
Quadro 2	- Resumo de comparação <i>modbus</i> e DNP3	55
Quadro 3	- Pilha integrada IEEE 1815 / TCP / GPRS	72
Quadro 4	- Cenários de codificação	74
Quadro 5	- Interfases de comunicação previstas para <i>smart grids</i>	75
Quadro 6	- Análise do tempo de transmissão dos quadros DNP3 encapsulados em GPRS	88

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AMI	Advanced Metering Infrastructure
BC	Banco de Capacitores
BPL	Power Line Communication
CCR	Centro de Controle da Rede
CRC	Cyclic Redundancy Check
CSC	Componentes Série Controlados
DSL	Digital Subscriber Line
DOE	US Department of Energy
D-TCSC	Distribution - Thyristor Controlled Series Compensator
EDC	Enterprise Data Center
EPRI	Electric Power Research Institute
FACTS	Flexible Alternating Current Transmission Systems
GTO's	Gate Turn Off Thyristor
GSM	Global System for Mobile Communication
GPRS	General Packet Radio Service
GWAC	Grid Wise Architecture Council
GOOSE	Generic Object Oriented Substation Events
HAN	Home Area Networks
IPFC	Interline Power Flow Controlle
IEC	International Electrotechnical Commission
IEDs	Intelligen tElectronic Devices
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IGBT's	Insulated Gate Bipolar Transistor
LTE	Long Term Evolution
MAC	Medium Access Control
MMS	Manufacturing Message Specification
NAN	Neighboing Area Network
NIST	National Institute of Standards and Technology
NETL	National Energy Technology Laboratory
OFMD	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
PLC	Power Line Communication
PMU's	Phasor Measurement Units
RAF	Reguladores do Angulo de Fase
RTUs	Remote Terminal Units

SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition
SG	Smart Grids
SVC	Static VAR Compensator
STATCOM	Static Synchronous Compensator
SSSC	Static Synchronous Series Compensator
TCSC	Thyristor Controlled Series Capacitor
TSSC	Thyristor Switched Series Capacitor
TCR	Thyristor Controlled Reactor
TSC	Thyristor Switched Capacitor
TTL	Transistor-Transistor Logic
UPFC	Unified Power Flow Controller
VSC	Conversor Fonte de Tensão
WAN	Wide Area Network
Wi-Fi	Wireless Fidelity
WiMAX	World Wide Interoperability for Microwave Access
XML	Extensible Markup Language

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Motivação	15
1.2	Objetivo	16
1.3	Estrutura do Trabalho	16
2	COMPENSAÇÃO E CONTROLADORES FACTS	17
2.1	Introdução	17
2.2	Sistemas Flexíveis de Transmissão e Distribuição	18
2.3	Classificação dos Dispositivos FACTS	19
2.4	Compensação Série	26
2.4.1	<i>Compensação Série em Linhas de Transmissão</i>	26
2.4.1.1	<i>Exemplo de Flexibilização da Transmissão Obtida Através de Controle da Reatância Série de uma Linha de transmissão</i>	28
2.4.2	<i>Compensação Série em Sistemas de Distribuição e Sub-Transmissão</i>	30
2.4.2.1	<i>Exemplo de Compensação série de um Sistema de Distribuição</i>	31
2.5	Compensação Série Considerando um TCSC no Sistema de Distribuição de Energia Elétrica	35
3	ASPECTOS DE COMUNICAÇÃO EM REDES INTELIGENTES	37
3.1	Introdução	37
3.2	Rede inteligente (Smart Grid)	38
3.3	Interoperabilidade	39
3.4	Elementos Tecnológicos de Comunicação	41
3.4.1	<i>Arquitetura de Comunicação</i>	41
3.4.1.1	<i>Rede HAN</i>	42
3.4.1.2	<i>Rede NAN</i>	44
3.4.1.3	<i>Rede WAN</i>	44
3.4.2	<i>Tipos de tecnologias</i>	45
3.4.2.1	<i>ZigBee</i>	46
3.4.2.2	<i>Celular</i>	47
3.4.2.3	<i>Comunicação em Linhas de Potência</i>	48
3.5	Tecnologia (GPRS)	48
3.6	Detalhamento de Padrões e Tecnologias de Comunicação	50
3.6.1	<i>DNP3</i>	51
3.6.2	<i>IEC 60870-5</i>	52
3.6.3	<i>Modbus</i>	53
3.6.4	<i>IEC 61850</i>	54
4	PROTOCOLO DNP3, SCADA E REDE GPRS	58
4.1	DNP 3	58
4.1.1	<i>Características Gerais</i>	60
4.1.2	<i>Especificações</i>	60
4.1.3	<i>Topologias</i>	61
4.1.4	<i>Fundamentos do Protocolo</i>	62
4.2	SCADA	68
4.2.1	<i>Flexibilidade da Arquitetura</i>	70

4.3	MODEM GPRS	71
4.3.1	<i>Interfases de Comunicação</i>	74
4.3.2	<i>Arquitetura da Solução de Telemetria</i>	75
4.3.3	<i>Servidor de Comunicação</i>	76
4.3.4	<i>Características Gerais</i>	76
4.3.5	<i>Especificações técnicas</i>	77
4.3.5.1	<i>Descrição hierárquica do modem</i>	77
4.3.5.2	<i>Características de hardware</i>	78
5	ESTUDO DE CASO	80
5.1	Introdução	80
5.2	Localização do D-TCSC	80
5.3	Monitoramento de Variáveis Elétricas	81
5.4	Características do modem	84
5.5	Análise de estudo de caso em geral	84
6	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	89
	REFERÊNCIAS	91

1 INTRODUÇÃO

A crescente demanda de energia associada às restrições ambientais impacta cada vez mais o planejamento e a operação dos sistemas elétricos atuais. Uma opção para suprir a demanda atual é a expansão e a inserção de novas tecnologias emergentes no sistema já existente. Isso implica na criação de novas estratégias de gestão para investimento no sistema e, assim, equilibrar aspectos econômicos, técnicos e ambientais para os sistemas de energia¹.

O transporte de energia é um dos tópicos mais importantes na análise dos sistemas elétricos de potência. A análise dos elementos que compõe a transmissão de energia permite a avaliação de diferentes aspectos como estabilidade, controle e análise de transitórios.

A rede de transmissão tem como função principal transportar a energia elétrica ou, em outros termos, o fluxo de potência. Significa que o sistema de transmissão, em função de suas características de operação, deve ser um sistema confiável e seguro, mesmo com a constante mudança da demanda.

Nesse contexto, os compensadores de reativos impactam significativamente o transporte da energia, alterando a capacidade das linhas de transmissão.

Concessionárias de transmissão de energia têm investido na flexibilização dos Sistemas de transmissão de corrente alternada (*Flexible Alternating Current Transmission Systems* - FACTS), provendo o sistema de potência de recursos para o controle dinâmico do fluxo de potência e dos estados das tensões em todos os níveis, desde a geração até o consumo.

Por intermédio de sistemas de comunicação, torna-se possível o monitoramento em tempo real dos controladores FACTS, promovendo a interação entre os compensadores e demais componentes dos sistemas, bem como entre os próprios compensadores. Este mesmo princípio pode ser utilizado nas redes de distribuição, em direção aos sistemas inteligentes.

Existe a necessidade da implementação de um sistema de comunicação que permita a integração de dados de todo o sistema de distribuição, subestações e a central de controle. Sendo assim, o controle dinâmico, aliado à operação coordenada e monitoramento dos diversos equipamentos distribuídos nos sistemas de energia, compõe a base da proposta das redes inteligentes (*Smart Grids* - SG) de energia elétrica.

Com isso, aumenta consideravelmente a possibilidade de investigação de novas tecnologias, que precisam ser compreendidas de forma que o setor elétrico possa evoluir e,

assim, avançar diante dos desafios impostos pela modernização do setor na direção dos conceitos de SG.

As tecnologias de informação e comunicação (TIC) terão um papel relevante em todas as fases do ciclo de geração, transporte, comercialização e consumo. A realidade da SG deve transformar o sistema elétrico de distribuição.³

A SG, baseada no uso de sensores, comunicações com capacidade de gestão da informação e controle de equipamentos concernentes ao sistema de potência, pode melhorar, em todos os aspectos, as funcionalidades do fornecimento de energia elétrica. Um sistema se converte em inteligente adquirindo dados, comunicando, processando a informação e fazendo controle com uma realimentação que permite que o sistema se ajuste às variações que podem surgir na operação real.

A seguir, apresenta-se a motivação do trabalho, os objetivos, a metodologia utilizada e a estrutura do trabalho.

1.1 Motivação

Desde a implementação da primeira rede de energia elétrica, não aconteceram inovações significativas na forma como a energia elétrica é fornecida ao consumidor. Hoje em dia, muitas dessas tecnologias continuam em uso, o que impõe limites à inovação.

A possibilidade do uso da energia alternativa e intermitente, as ameaças à segurança, a economia de energia para redução de picos de demanda e controles digitais para aumentar a confiabilidade são alguns desafios que terão que ser enfrentados nos próximos anos. É por isso que na atualidade elabora-se um novo contexto para revolucionar a rede elétrica, de onde nasceu o conceito das SG.

Em termos gerais, SG é a aplicação de tecnologia da informação para o sistema elétrico de potência, integrada aos sistemas de comunicação e infraestrutura de rede automatizada. Especificamente, envolve a instalação de sensores nas linhas da rede de energia elétrica, o estabelecimento de um sistema de comunicação confiável em duas vias com ampla cobertura com os diversos dispositivos e automação dos ativos. Os sensores, então, analisam essas informações para determinar o que é significativo.

A comunicação em redes inteligentes tem motivado diversas linhas de pesquisa. O foco principal da proposta apresentada neste trabalho é a comunicação de um compensador série controlado no sistema de distribuição (*Distribution Thyristor Controlled Series*

Compensator - D-TCSC), a partir da obtenção de dados em tempo real, por meio da implementação de um sistema de comunicação moderno. A comunicação inicia na rede de distribuição, até chegar ao centro de controle, através da filosofia de comunicação considerada na SG. Considera-se também a demanda como uma informação importante dentro do funcionamento do sistema inteligente, até chegar aos operadores da rede com ambientes computacionais que permitem monitorar o sistema em tempo real e também influir sobre o mesmo em resposta ao comportamento, seja da demanda ou da geração.

1.2 Objetivo

O objetivo deste trabalho é o estudo de um sistema de comunicação entre um compensador série, através de transmissão via rede celular GPRS, o qual opera em uma rede de distribuição de energia elétrica, e um centro de controle, considerando os princípios de comunicação propostos em SG.

1.3 Estrutura do Trabalho

Este trabalho está organizado em seis capítulos. Neste capítulo introdutório, são descritos, de forma geral, a motivação e objetivo da pesquisa de comunicação através da filosofia de SG em uma rede de distribuição.

No Capítulo 2, são apresentados os principais controladores FACTS, de acordo com a característica do funcionamento, bem como uma descrição detalhada do *Thyristor Controlled Series Compensator* (TCSC).

No Capítulo 3, são descritos os aspectos relevantes da comunicação considerados em SG, em relação às arquiteturas das redes de comunicação.

No Capítulo 4, apresenta-se uma introdução aos protocolos de comunicação mais relevantes, considerando sua utilização em SG, em relação às especificações, características, topologias, fundamentos e modo de transmissão de dados.

No Capítulo 5, apresentam-se um estudo de caso da comunicação entre um D-TCSC, instalado em um ramal de uma rede de distribuição, com o centro de controle. Além disso, o capítulo efetua uma análise teórica da interface de comunicação GPRS com encapsulamento dos quadros do protocolo DNP3.

No Capítulo 6, apresentam-se as conclusões da pesquisa e trabalhos futuros.

2 COMPENSAÇÃO E CONTROLADORES FACTS

2.1 Introdução

Os controladores FACTS começaram a ser implementados a partir do final da década de 60 por grupos diversos, mas o nome FACTS só passou a existir a partir de 1988, quando Hingorani publicou os seus artigos.⁴

Os controladores FACTS vêm tornando possível o desenvolvimento de equipamentos mais sofisticados e adequados às aplicações às que são destinados. O controle do fluxo de potência e a compensação de linhas de transmissão é obtido através da adequação de tensões do sistema, da compensação da reatância das linhas e do ângulo de transmissão entre tensões de barra. O princípio baseia-se na aplicação de compensação paralela, compensação série e na composição entre elas.

Ao longo dos tempos, desde os começos da expansão das redes elétricas de energia, apareceram inúmeros compensadores com o objetivo de promover o controle do fluxo de potência e a compensação de linhas de transmissão desejadas. Esses métodos eram essencialmente baseados em dispositivos eletromecânicos. Com o surgimento e evolução da eletrônica de potência e, conseqüente, o aparecimento dos controladores FACTS, verificaram-se enormes progressos nesta área.

FACTS é definido pela IEEE como “Sistema de transmissão em corrente alternada que utilizam dispositivos de eletrônica de potência e também outros controladores estáticos, com o objetivo de aumentar o controle e a capacidade de transferência de potência de um sistema elétrico.”⁵

O desafio do conceito FACTS é prover uma rede de transmissão de energia, que seja capaz de entregar toda potência de energia gerada aos centros de cargas, não importando a distância entre as cargas e as fontes, com disponibilidade de controle do fluxo de potência a ser distribuído ou transmitido, e encontrar soluções para a melhoria do sistema de transmissão solucionando os problemas de perdas, estabilidade, custos e o meio ambiente. Os controladores atuam automaticamente, fazendo a compensação, quando necessário.⁶

2.2 Sistemas Flexíveis de Transmissão e Distribuição

Os sistemas flexíveis em corrente alternada aumentam a confiabilidade nos sistemas elétricos de potência, incluindo os sistemas de sub-transmissão e distribuição, e geram uma redução nos custos do fornecimento de energia elétrica, melhorando a qualidade e a eficiência do transporte e distribuição da energia. Diferentes aspectos relativos a flexibilização dos sistemas de energia elétrica apresentam soluções que podem ser implementadas a partir da utilização de equipamentos tradicionais. Entre esses equipamentos estão os chamados controladores de potência e compensadores de reativos, tais como os transformadores defasadores, os compensadores série e shunt (ou em derivação), reatores de núcleo saturado, etc.³⁴

No passado, tais equipamentos caracterizavam-se pela utilização exclusiva de componentes passivos (capacitores e indutores), chaveados mecanicamente. No início dos anos cinquenta, com o avanço da eletrônica de potência, após invenção do transistor, os controladores convencionais passaram a utilizar componentes eletrônicos em seus acionamentos.

Nos anos setenta, com a invenção dos tiristores de potência, os controladores começam a utilizar chaveamentos eletrônicos no acionamento de potência, limitados somente pelos níveis de potência admissíveis por tais componentes eletrônicos.⁷

Posteriormente, no final dos anos oitenta, a flexibilização dos sistemas passou a ser associada aos controladores do sistema que utilizam eletrônica de potência.⁸ Desta forma, criou-se o acrônimo FACTS para identificar os controladores eletrônicos utilizados na flexibilização dos sistemas de corrente alternada, tomando-se o cuidado de deixar de fora a transmissão em corrente contínua. Na transmissão, os equipamentos eletrônicos apresentam melhores avanços tecnológicos em relação à distribuição. Porém, tais avanços permitem considerar uma solução técnica nos sistemas de distribuição, com a implementação dos chamados D-FACTS.⁹

Os controladores FACTS são responsáveis por boa parte das pesquisas desenvolvidas pelas concessionárias, centros de pesquisa e fornecedores envolvidos com sistemas elétricos de potência. Os controladores FACTS, contribuem com maior velocidade e precisão no controle dos parâmetros do sistema de potência, sendo que entre esses parâmetros que podem ser controláveis inclui-se tensão, corrente, ângulo de transmissão, potência ativa e reativa.

Apesar da grande flexibilidade oferecida pela combinação de transmissão em corrente contínua e alternada, os grandes custos das estações conversoras que compõe a transmissão em alta tensão continuam sendo o grande limitador de sua maior utilização. Com relação à distribuição, controladores eletrônicos auxiliam as concessionárias a entregar uma energia limpa e confiável aos consumidores, entre estes controladores incluem-se relés, disjuntores estáticos, chaves eletrônicas, compensadores estáticos de reativos, religadores estáticos, filtros ativos, reguladores de tensão, etc.¹⁰

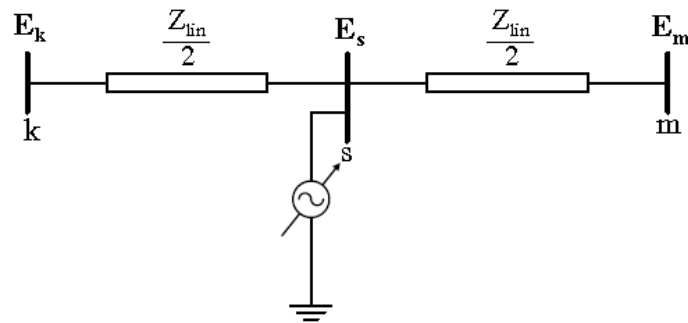
2.3 Classificação dos Dispositivos FACTS

Nas últimas décadas houve um aumento crescente na demanda de energia elétrica nos países emergentes, entre eles o Brasil. Em princípio, a construção de novas usinas e linhas de transmissão supre o problema de atendimento. Porém, além de ser uma medida de custo mais elevado, a construção de novas usinas e linhas de transmissão encontra sérias restrições na legislação de preservação ambiental, o que dificulta e atrasa a construção de novos empreendimentos neste setor. Isso obriga a busca de novas alternativas de implementação mais rápida e, também, que os sistemas operem cada vez mais próximos de seus limites térmicos e de estabilidade.

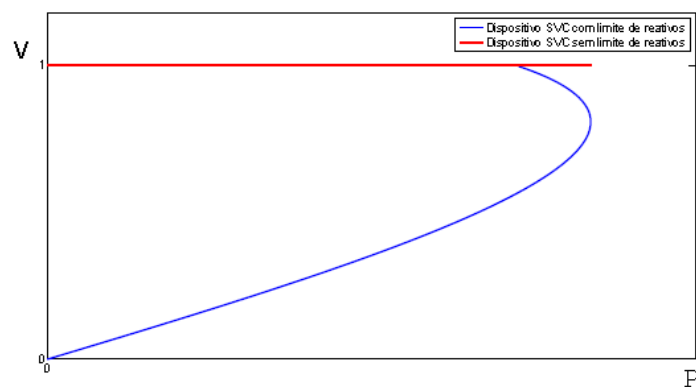
Com a viabilidade econômica e técnica, que apresenta a implementação dos dispositivos FACTS, os fabricantes de equipamentos e instituições de pesquisa estão investindo consideravelmente nesse conceito de estabilidade, aumento da capacidade e economia para o sistema elétrico.

Diferentes dispositivos FACTS foram desenvolvidos, dentre dos quais se destacam: capacitores série controlados (CSC), comutadores de carga, reguladores do ângulo de fase (RAF), compensadores estáticos (SVC) e controladores unificados de fluxo de potência (UPFC).¹¹ A maioria desses dispositivos desempenha um papel útil durante a operação tanto em regime permanente quanto em regime transitório.

Os dispositivos em paralelo, apresentados na Figura 1, atuam na rede como uma reatância capacitiva variável, fornecendo ou consumindo reativos, de acordo com as necessidades dos sistemas. Estes dispositivos podem ser entendidos como fontes de tensão ou correntes conectados em derivação com o sistema.

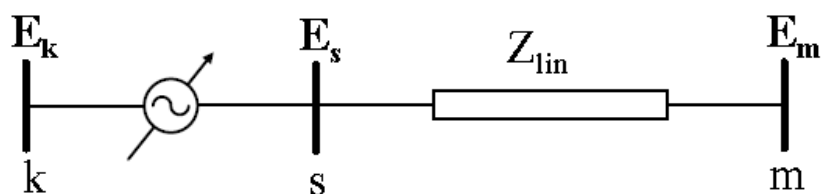
Figura 1 — Dispositivo FACTS conectado em derivaçãoFonte: Siqueira¹²

Os dispositivos em derivação podem controlar a tensão na barra, como é mostrado na Figura 2, preservando os limites mínimos ou máximos estabelecidos ou regulamentados.

Figura 2 — Curva PV- Dispositivos SVCFonte: Siqueira¹²

Os dispositivos FACTS que atuam em série com a linha podem ser modelados como fontes de tensão ou corrente, apresenta-se a conexão na Figura 3.

Assim, a conexão em série possibilita controlar de forma efetiva o fluxo de potência em linhas específicas aumentando de forma significativa a quantidade de energia transportada pelo sistema.

Figura 3 — Dispositivo FACTS conectado em sérieFonte: Siqueira¹²

Os controladores FACTS podem ser classificados em dois grupos (a e b) de acordo com o tipo de compensação:

a) Compensação de Sistemas

- Regulação de tensão em sistemas elétricos fracos;
- Redução de perdas na transmissão;
- Aumento da capacidade de transmissão;
- Aumento dos limites de estabilidade transitória;
- Amortecimento de oscilações;
- Suporte dinâmico de tensões;

b) Compensação de Cargas

- Estabilização do nível de tensão nos terminais de linhas longas;
- Redução do consumo de potência reativa;
- Compensação de assimetria de correntes;
- Redução de perdas globais;
- Redução das flutuações de tensão, cintilação luminosa (*flicker*), harmônicas e outras distorções.

Os controladores FACTS, podem ser divididos em quatro gerações.

1. Primeira geração – Controladores FACTS comutados por tiristores que podem ser conectados em série e paralelo a rede.
 - Conectados em derivação à rede são: o compensador estático de potência reativa (Static VAR Compensator - SVC) composto por controle reativo por tiristor (*Thyristor Controlled Reactor* - TCR) e/ou o condensador controlado por tiristor (*Thyristor Switched Compensator* - TSC).
 - Conectados em série à linha de transmissão: o capacitor série chaveado a tiristores (*Thyristor Switched Series Compensator* - TSSC) e o compensador série controlado a tiristores (*Thyristor Controlled Series Compensator* - TCSC). Um equipamento que possui as características série e em derivação de forma integrada é o *Phase Shifter*.
2. Segunda geração – é composta por dispositivos FACTS comutados por transistores IGBTs (*Insulated Gate Bipolar Transistor* - IGBT's) ou tiristores GTO's (*Gate Turn*

Off Thyristor). Utilizando esses tiristores, tem-se o compensador shunt STATCOM (*Static Synchronous Shunt Compensator*) e o compensador série, SSSC (*Static Synchronous Series Capacitor*).

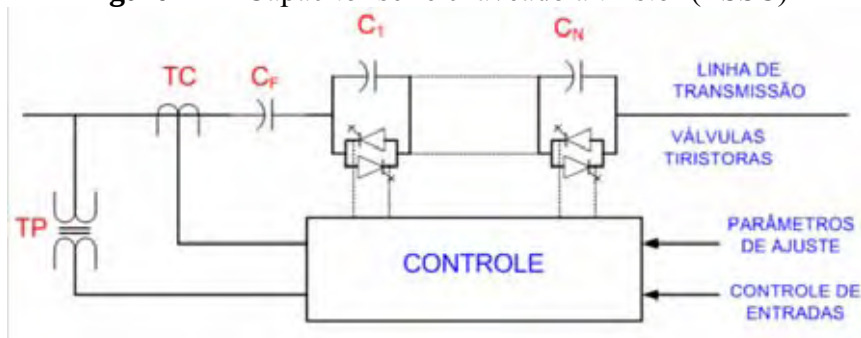
3. Terceira geração - equipamentos FACTS compostos pela integração dos equipamentos série e paralelo numa mesma linha de transmissão. Um resultado é o UPFC (*Unified Power Flow Controller* - UPFC), o qual é um equipamento combinado a partir do SSSC e do STATCOM.
4. Quarta geração- equipamentos FACTS, onde a integração dos equipamentos série e paralelo é feita em linhas diferentes. Isto resulta em equipamentos com os nomes IPFC (*Interline Power Flow Controller* - IPFC) e o compensador estático conversível (*Convertible Static Capacitor*) e outras possibilidades.^{7,8,9}

Em relação à função dos componentes eletrônicos que os compõe, estes podem ser ainda divididos em três grupos:

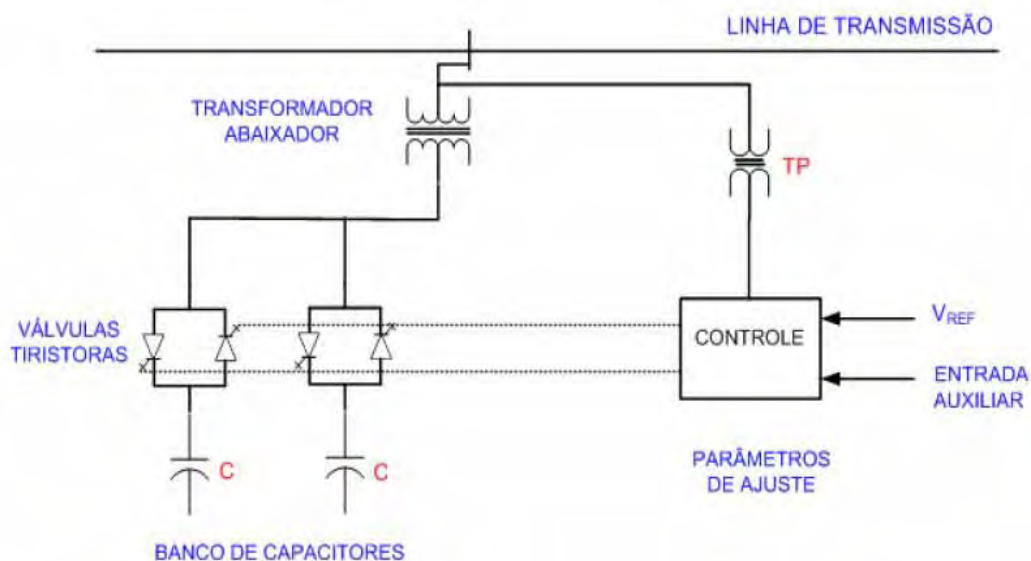
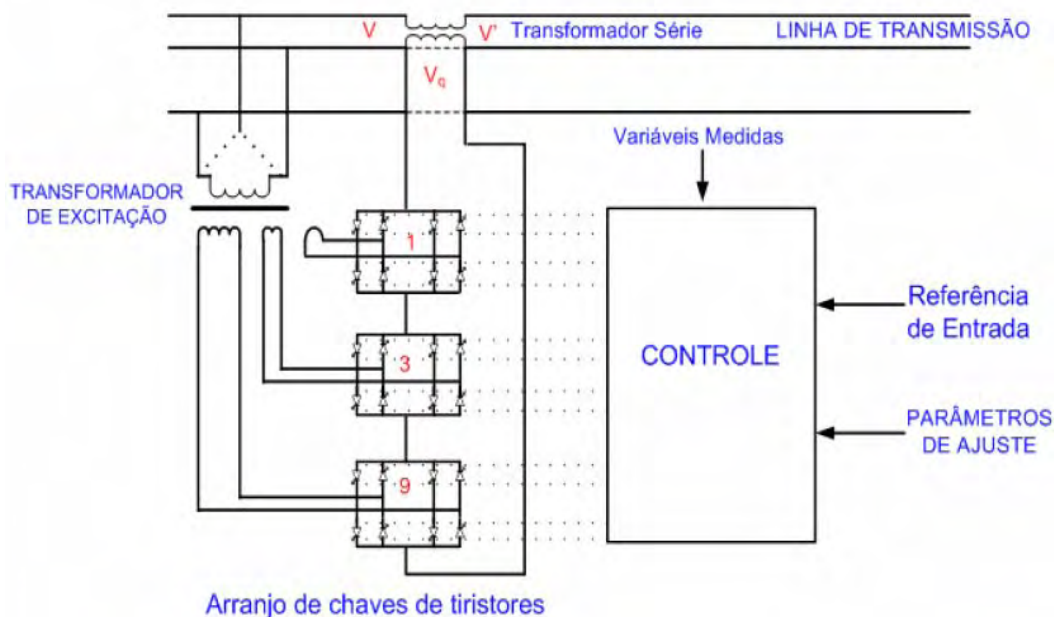
- Chaveados;
- Controlados;
- Avançados.

A seguir serão apresentados alguns exemplos de controladores. Nas Figuras 4, 5 e 6 apresentam-se os controladores TSSC, TSC e Transformador desfasado como *tap* chaveado a tiristor, respectivamente, os quais utilizam funções básicas dos componentes eletrônicos de potência.

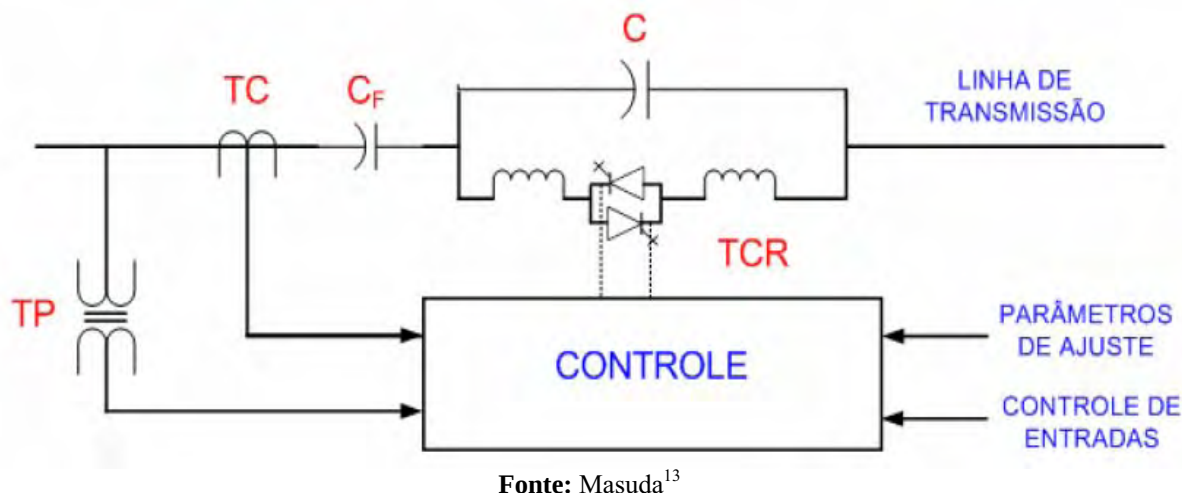
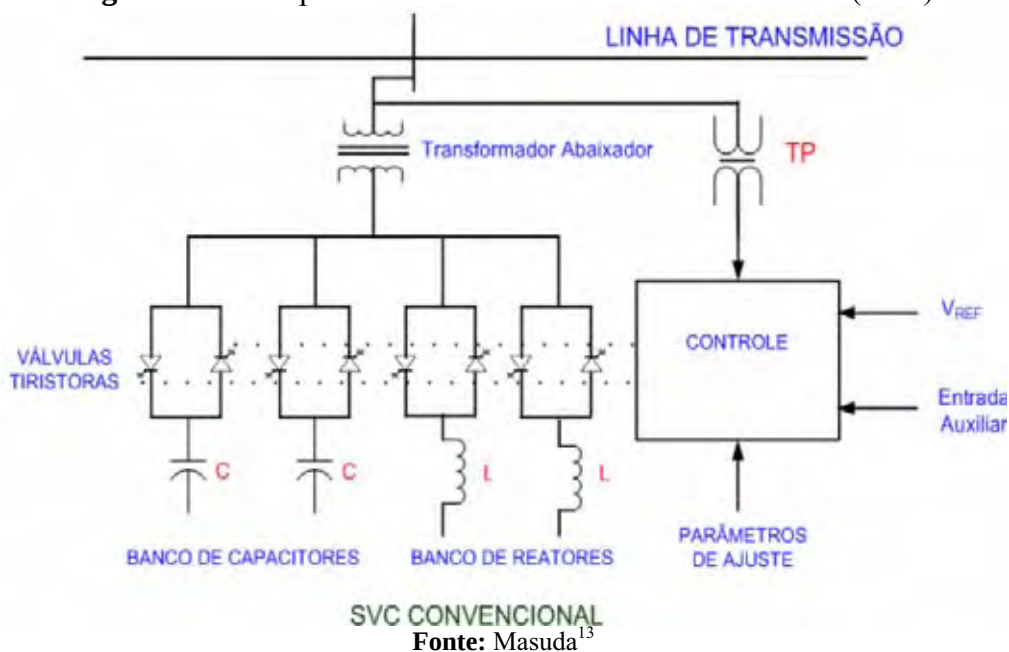
Figura 4 — Capacitor série chaveado a tiristor (TSSC)



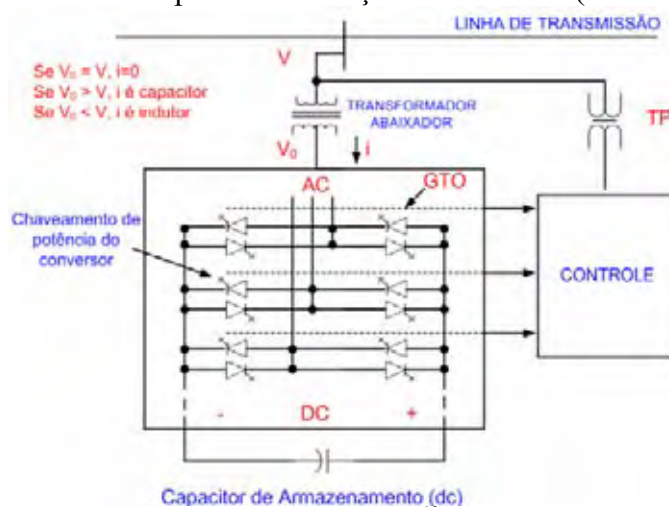
Fonte: Masuda¹³

Figura 5 — Capacitor shunt chaveado a tiristor (TSC)Fonte: Masuda¹³**Figura 6** — Transformador desfasado com tap chaveado a tiristorFonte: Masuda¹³

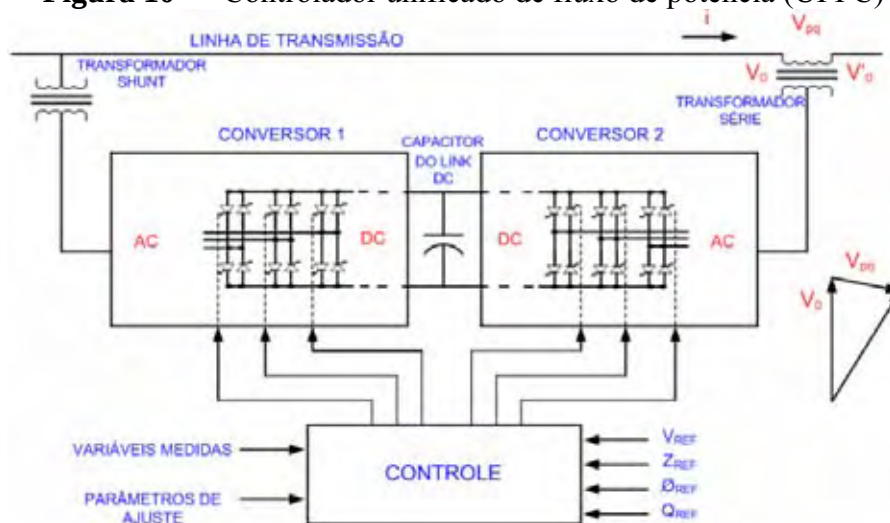
O compensador estático SVC é utilizado com sucesso há duas décadas, enquanto o TCSC está sendo implementado e estudado nos sistemas já existentes. Ao TCSC é atribuída a capacidade de evitar ressonância subsíncrona (de caráter eletromecânico), dado pelo controle quase linear que permite ao operador buscar uma faixa de operação fora da frequência de ressonância do sistema.^{11,14} Nas Figuras 7 e 8, tem-se a ilustração de um exemplo de conexão dos compensadores TCSC e SVC, respectivamente.

Figura 7 — Compensador série controlado a tiristor (TCSC)**Figura 8** — Compensador estático de reativo convencional (SVC)

Grande parte dos controladores avançados encontram-se em fase de experimental, embora existam protótipos do STATCOM e UPFC funcionando nos EUA. Trata-se de um conversor CC/CA que permite injetar reativos na rede a partir de uma fonte CC, a qual pode ser realizada, em princípio usando apenas capacitores. A função de controle é regular o nível de tensão da rede CA usando energia reativa. No entanto, a quantidade de reativos produzida não está diretamente relacionada com os capacitores presentes no lado CC (os quais servem apenas para estabilizar a tensão), mas sim com a capacidade de corrente dos interruptores eletrônicos (transistores e tiristores) do conversor.¹⁰ Na Figura 9, tem-se a ilustração de um exemplo de conexão do STATCOM.

Figura 9 — Compensador avançado de reativos (STATCOM)Fonte: Masuda¹³

UPFC são compensadores baseados em interruptores eletrônicos totalmente controláveis que combinam os controles *shunt* e série de modo que resulte o fluxo desejado de potência ativa e reativa. Os dois controles são combinados de forma que a potência absorvida pelo elemento *shunt* é usada para regular o fluxo da potência através da linha. O conversor pode injetar potência ativa na rede. A potência absorvida pelo conversor em derivação serve para compensar as perdas dos conversores e para fazer injeção de potência ativa pelo conversor série. Outros autores denominam esta estrutura de compensador série estático síncrono (SSSC).^{13,15} Na Figura 10, tem-se a ilustração de um exemplo de conexão do UPFC.

Figura 10 — Controlador unificado de fluxo de potência (UPFC)Fonte: Masuda¹³

2.4 Compensação Série

A incorporação de controladores FACTS na operação de sistemas elétricos, além de abrir um enorme campo para a aplicação da tecnologia de controle de alta potência, ao mesmo tempo permite utilizar melhor a infraestrutura de transmissão já disponível.

A filosofia de compensação série em sistemas de transmissão possibilita o aumento da margem de estabilidade tanto em regime permanente como transitório. Em níveis de alta e extra-alta tensão, tem-se uma confiabilidade comprovada através de inúmeros sistemas em operação. A utilização desta técnica em sistemas de distribuição tem apresentado benefícios, sendo que muitos projetos comprovam técnica e economicamente as vantagens sobre o sistema convencional com reguladores de tensão e capacitores em derivação (*shunt*).³⁵

Atualmente, com a necessidade de uma energia com qualidade compatível às exigências de um mercado cada vez mais rigoroso, a utilização de capacitores série também é direcionada no sentido de reduzir flutuações de tensão. Apesar das inerentes vantagens da compensação série como a regulação automática e instantânea, melhoria do perfil de tensão e o suporte à partida de motores, existem diferentes efeitos, os quais surgem principalmente dos fenômenos de ferorressonância e oscilações subsíncronas. O conceito principal da compensação série está baseado na redução da reatância indutiva da linha por meio da inserção de bancos de capacitores em série.

Este estudo aborda a influência da compensação série, mais especificamente o TCSC, que será instalado na distribuição, com uma comunicação utilizando a filosofia de SG.

Ao longo dos anos, o TCSC tem sido estudado com o propósito de melhorar a estabilidade transitória dos sistemas de energia elétrica. Em pesquisas mais recentes, estudaram-se os efeitos do TCSC na melhoria da estabilidade transitória, utilizando sinais remotos com o auxílio da tecnologia de unidades de medição fasorial (*Phasor Measurement Units*, PMU's). Esta tecnologia é utilizada para medir em tempo real sinais remotos e assim transferí-los para a entrada do TCSC, visando melhoria da estabilidade transitória.^{14,16,17}

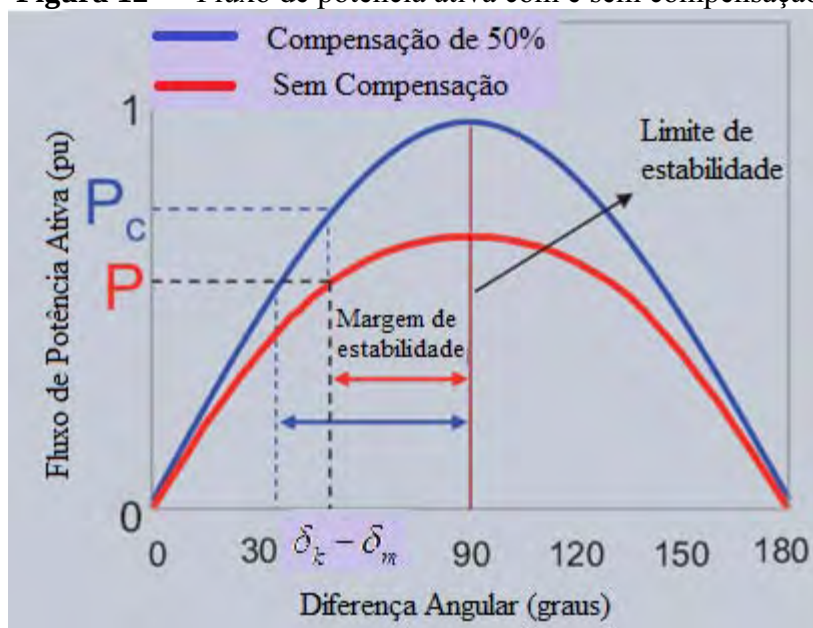
2.4.1 Compensação Série em Linhas de Transmissão

As linhas de transmissão com compensação série sempre foram um dos maiores desafios da engenharia de proteção de sistemas elétricos. É um recurso muito utilizado para aumentar a capacidade de transmissão de energia das linhas de transmissão. Os parâmetros

série de uma linha de transmissão, resistência e reatância indutiva, são os responsáveis pelas grandes quedas de tensão nas linhas. A reatância indutiva, além do mais, é também responsável pelo ângulo entre as tensões nas extremidades da linha e, portanto, pelo grau de estabilidade, tanto estática como dinâmica, do sistema de transmissão.³⁶

Para a manutenção de seu campo magnético, a linha necessita da energia reativa que absorve do sistema alimentador. Seus efeitos são proporcionais à corrente na linha. A compensação poderá, então, ser feita através de capacitores ligados em séries, capazes de reduzir e mesmo anular os efeitos da indutância da linha. Entretanto, a utilização deste recurso tem um grande impacto na complexidade dos sistemas de proteção. Dentre os fenômenos relacionados com a compensação série que afetam a proteção podemos destacar os seguintes:

- Inversão de tensão – Quando ocorre uma falha com resistência elevada, próxima ao banco de capacitores, de maneira que a reatância entre o relé e o ponto de falta tem característica capacitiva, a tensão na barra se comporta como se o curto-circuito tivesse ocorrido atrás do relé. Este problema, no entanto, pode ser facilmente resolvido instalando-se os transformadores de potencial à frente do banco de capacitores.
- Inversão de corrente – Em alguns casos, quando ocorre uma falta próxima ao banco de capacitores, a reatância equivalente total vista a partir ponto de falta tem característica capacitiva. Nesses casos, é a corrente que se inverte afetando direcionalidade do relé.
- Ressonância subsíncrona – Durante uma falta em uma linha de transmissão compensada surgem componentes de diversas frequências, em função dos diversos modos de ressonância que podem ocorrer. A maior parte das componentes são subsíncronas, ou seja, suas frequências naturais são inferiores à frequência fundamental. As frequências subsíncronas fazem com que os fasores medidos pelos relés digitais se aproximem da solução final através de espirais, que são tão maiores quanto a magnitude destas componentes. Estas espirais podem induzir os relés a erros, que vão desde seu alcance a até erros de direcionalidade quando a falta ocorrer muito próxima ao banco.
- Desbalanço das impedâncias de fase – Existem duas maneiras de se protegerem os bancos de capacitores contra sobretensões: por meio de “gaps” (ou centelhadores) ou por MOVs (ou varistores). Quando estes elementos atuam apenas em uma das fases, o sistema fica desequilibrado, o que pode comprometer o desempenho das proteções.

Figura 12 — Fluxo de potência ativa com e sem compensação

Fonte: Miotto⁸

Através da Figura 12, é mostrado que a compensação aumenta a capacidade de transmissão da linha em 100%. Outro aspecto importante e desejado é que para um valor dado de fluxo de potência ativa, a margem de estabilidade do ângulo aumente consideravelmente após a compensação.

Com base no exemplo, verifica-se que a redução da reatância série total da linha de transmissão, através da inclusão de uma compensação reativa capacitiva série, pode apresentar os seguintes benefícios: 1) aumento da capacidade de transferência de potência, em função do aumento dos limites de estabilidade, uma vez que a potência $P_{\max}$ aumenta com a redução da reatância X_{total} , onde $P_{\max} = \frac{V_k V_m}{X_{\text{total}}}$; 2) aumento da margem de estabilidade de regime permanente e de regime transitório, com a diminuição da reatância X_{total} , observando um ângulo de fase δ menor para uma mesma transferência de potência P ; 3) Melhor regulação de tensão, e consequentemente, a redução de perdas, apresentando o domínio sobre a reatância série da linha, através de uma compensação reativa capacitiva controlada, que possibilita o controle de divisão de fluxo de potência e a consequente redução das perdas globais.

A tecnologia eletrônica FACTS permite controlar diretamente a reatância equivalente da linha (X_{km}) através de compensação série. Um compensador capacitivo pode ser instalado

em qualquer ponto da linha, onde já exista uma subestação. Para a operação em regime permanente, controlar a reatância série significa que se poderá monitorar e direcionar o fluxo de potência através da rede, alterando as “distâncias elétricas” entre as barras da rede.

Em condições dinâmicas se poderão amortecer controladamente as oscilações de potência na rede, através da modulação da reatância série. Esses são problemas típicos enfrentados hoje pelas empresas do setor elétrico, que necessitam operar com maior segurança próximo dos limites de carregamento dos equipamentos.⁸

2.4.2 Compensação Série em Sistemas de Distribuição e Sub-Transmissão.

O crescimento econômico, que leva consequentemente ao aumento da demanda de energia elétrica em diversos sistemas elétricos, requer das áreas de planejamento das concessionárias de energia um esforço significativo no sentido do aumento da capacidade do sistema elétrico, bem como de manter os níveis de qualidade e confiabilidade dentro dos padrões exigidos pelos órgãos reguladores, não apenas na transmissão, mas também na sub-transmissão e na distribuição de energia elétrica.³⁷

A confiabilidade comprovada dos bancos capacitores série que são utilizados na transmissão e os ganhos obtidos com a sua aplicação, conta com vários exemplos instalados ao redor do mundo e inclusive no Brasil, aliado às necessidades de melhoria dos circuitos existentes, conduziu ao desenvolvimento destes equipamentos para aplicação destes em sistemas com tensões inferiores. Porém, para manter a mesma confiabilidade dos equipamentos para compensação série utilizados na transmissão e, em função da grande diversidade de cargas e dinâmica nos sistemas de sub-transmissão e distribuição, foram desenvolvidos sistemas de controle e proteção visando proteger o equipamento e o sistema elétrico contra problemas de oscilações sub-harmônicas e curtos-circuitos ocorridos ao lado da carga.

Ressalta-se então, que dentre os avanços tecnológicos que permitiram a compensação série em sistema de distribuição, foi o desenvolvimento tecnológico dos varistores, capacitores e a melhoria no sistema de controle e proteção, além das ferramentas de planejamento, o que viabiliza a implementação deste tipo de solução.⁹

A utilização de compensação série em sistema de distribuição é, muitas vezes, associada com os circuitos de distribuição de energia radiais muito longos, os quais fornecem energia a clientes remotos. A aplicação da compensação série apresenta as seguintes vantagens:

- Aumento da capacidade de transmissão de energia pela diminuição da reatância total do circuito e, além disso, melhora o perfil de tensão ao longo do circuito.
- Diminui o nível de perdas do sistema.
- Melhora a regulação de tensão e equilibra os níveis de potência reativa.
- Proporciona suporte para o sistema durante o início de motores síncronos e assíncronos de grande porte.
- Melhora a divisão de corrente entre os circuitos paralelos.
- Diminui as variações de tensão com a mudança da demanda.
- Um aumento moderado em correntes de curto-circuito para faltas a jusante do capacitor série, sem um aumento do nível de falha na subestação.
- Controle contínuo da tensão.
- Controle do fluxo de reativos, dependente ou não da corrente de curto-circuito.
- Controle parcial do nível curto circuito, ao longo do alimentador, o que reduz problemas ligados à partida de motores, coordenação da proteção, ou outros ligados a variações momentâneas de tensão provocadas por manobras na rede ou entrada e saída de cargas.

2.4.2.1 Exemplo de Compensação Série de um Sistema de Distribuição

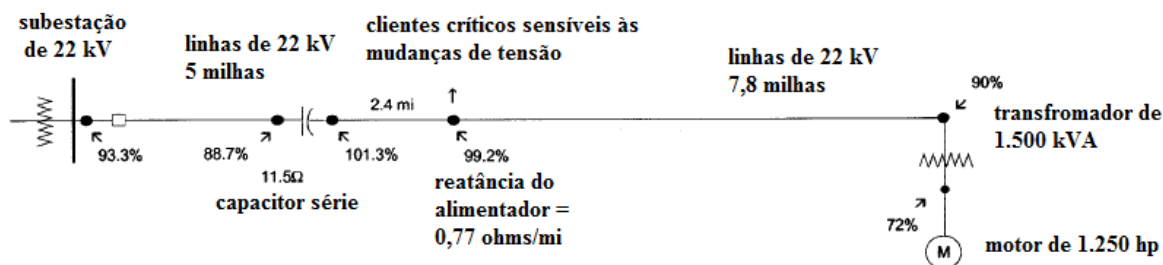
Nesta subseção observa-se um exemplo do comportamento que apresenta o sistema de distribuição considerando o arranque de um motor de indução e também uma compensação série no circuito onde o motor está conectado.

A potência reativa consumida por um motor de indução ou um motor síncrono durante a partida, é muito maior do que a consumida pelo motor durante o funcionamento normal. A queda de tensão, durante o arranque do motor pode ser tão grande que pode afetar o fornecimento dos outros clientes ligados à rede de alimentação. No pior caso, o motor não será capaz de iniciar, devido à queda de tensão excessiva causada pela grande potência reativa consumida durante o arranque, esse problema é resolvido com a instalação de um condensador em série no circuito de alimentação do motor, aqui a queda de tensão pelo arranque pode ser compensada.

Na Figura 13, apresenta-se o diagrama unifilar de um circuito de distribuição onde é conectado um motor de indução, o qual tem como objetivo observar o comportamento do

sistema de distribuição considerando que a linha possui instalado um sistema de compensação série, isto foi desenvolvido por Miske.¹⁹

Figura 13 — Diagrama do circuito utilizado no exemplo

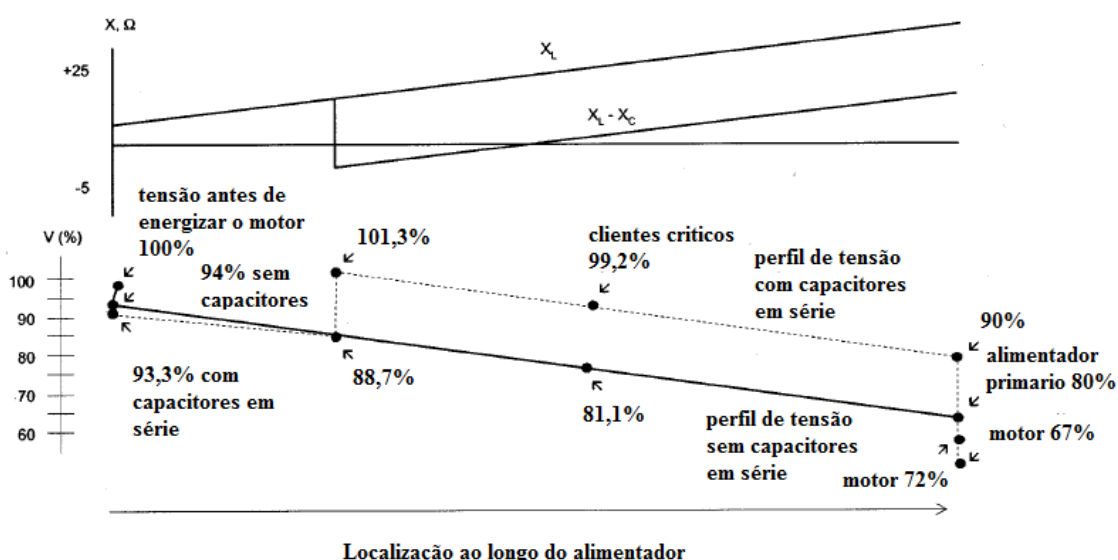


Fonte: Miske¹⁹

Na Figura 14, apresenta-se um digrama de impedâncias em função da distância do alimentador principal do sistema de distribuição e simultaneamente com a distância do alimentador apresentam-se os níveis de tensão, considerando que no sistema está instalada a compensação série ou não. Isto foi desenvolvido por Miske.¹⁹

Através do exemplo desenvolvido por Miske¹⁹, mostra-se o nível de compensação série na Figura 14, em um sistema de distribuição, considerando que a conexão de um motor de indução diminui consideravelmente os níveis de tensão da barra onde está conectado, porém, Miske¹⁹ demonstrou que com a utilização da compensação série em um sistema de distribuição é possível diminuir as diferentes consequências que têm o sistema com a presença de uma carga considerável.

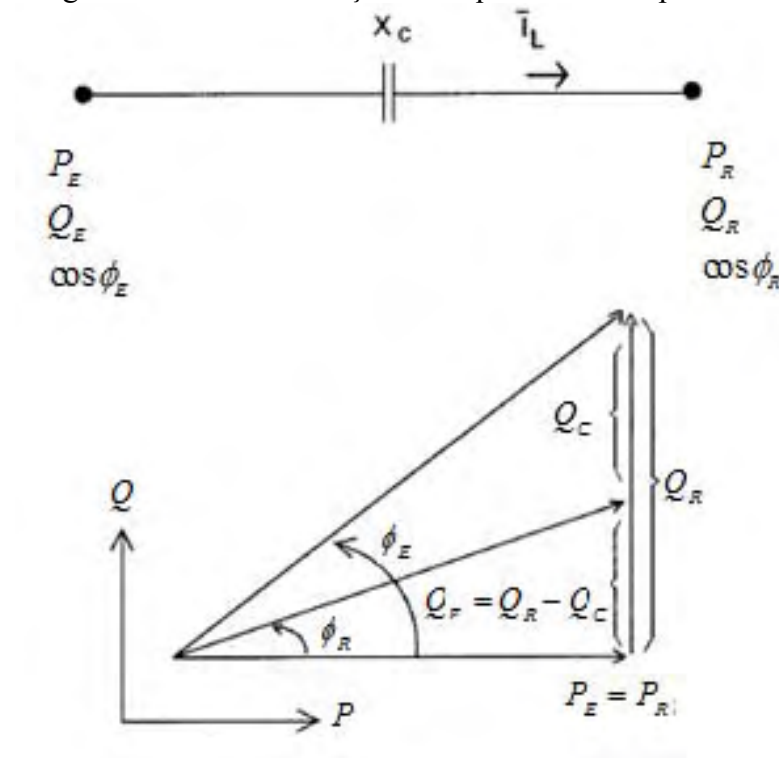
Figura 14 — Perfil de tensão e diagrama de impedancias de um circuito de distribuição com o início de um motor de indução



Fonte: Miske¹⁹

Com o exemplo apresentado por Miske¹⁹, observa-se que o sistema apresenta principalmente uma redução do nível de potência reativa que representa o fenômeno indutivo nas linhas por fase, o qual pode ser representado pelos níveis de potência reativa, apresentado por Miske¹⁹, e representados na Figura 15 através de um diagrama fasorial.

Figura 15 — Diagrama fasorial da redução do requerimento de potência reativa por fase



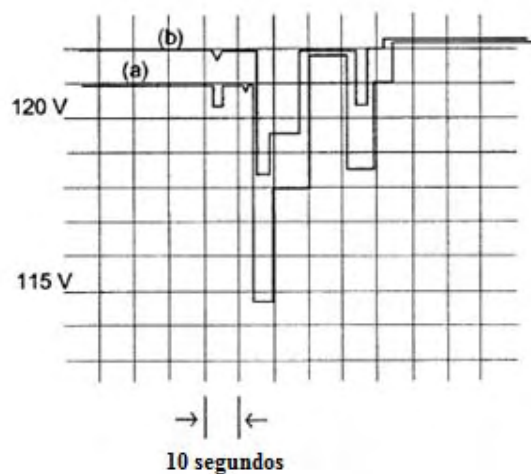
Fonte: Miske¹⁹

Onde P_E é a potência ativa enviada; Q_E é a potência reativa enviada desde a fonte; P_R e Q_R é a potencia ativa e reativa respetivamente recebida no final da linha; e R_L é a componente real da impedância correspondente a linha de transmissão.

Observa-se através da equação (2) uma redução nas flutuações de tensão apresentadas por Miske¹⁹, e mostradas na Figura 16.

$$\Delta V \cong \frac{P_R R_L + Q_R (X_L - X_C)}{V_R} \quad (2)$$

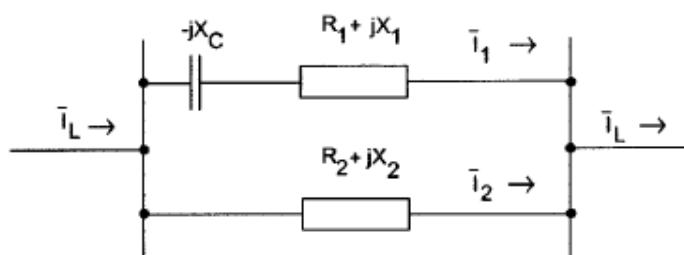
Figura16—Gráficos típicos que mostram a redução das flutuações de tensão (a) Sem capacitor série (b) Com capacitor série



Fonte: Miske¹⁹

Quando os circuitos estão conectados em paralelo, a corrente em cada circuito é inversamente proporcional à impedância do circuito. Em alguns casos, essa divisão não é compatível com a capacidade de corrente dos circuitos ou dos objetivos do planejador da rede. Os condensadores em série em um circuito servem para ajustar a relação de impedância e, conseqüentemente, o equilíbrio da corrente entre os circuitos fica em um valor desejado.

Figura 17 — Melhoria da divisão de corrente entre circuitos paralelos, por meio de compensação série.



Fonte: Miske¹⁹

Observa-se através da equação (3) como o comportamento da corrente pode melhorar com a instalação de capacitores série até ficar em um valor desejado. Isto para o circuito mostrado na Figura 17.¹⁹

$$\frac{X_1 - X_C}{X_2} = \frac{R_1}{R_2} \quad (3)$$

Onde $Z_1 = R_1 + j(X_1 - X_c)$ é a impedância correspondente à linha com presença de compensação série, e $Z_2 = R_2 + jX_2$ é a impedância correspondente à linha sem compensação, mostradas na Figura 17.

Finalmente, Miske¹⁹ mostra que os capacitores em série são mais eficazes em circuitos onde a proporção de variação de carga é mais elevada, envolvendo um elevado conteúdo de potência reativa. Também a conexão de capacitores em série, pode ser mais econômica, porém os diferentes cenários que apresentam os sistemas de distribuição envolve uma análise cuidadosa de cada caso.

2.5 Compensação Série Considerando um TCSC no Sistema de Distribuição de Energia Elétrica

A aplicação do compensador série na distribuição é muito antiga e visa compensar, ou até sobrecompensar, a parcela da reatância indutiva das linhas, proporcionando regulação de tensão, redução do nível de perdas e melhoria do fator de potência da rede. A sobrecompensação pode ainda proporcionar, se tomado os devidos cuidados, melhores resultados pois, além de compensar a indutância da linha, compensa também parcela significativa dos reativos do sistema a montante da linha, reduzindo a corrente no lado da fonte do compensador, minimizando perdas e ampliando a faixa de regulação de tensão. Isto permite que o compensador série seja, em muitos casos, uma boa alternativa para a regulação da tensão, quando comparada com alternativas convencionais.¹⁸

Soluções normalmente utilizadas para resolver problemas de regulação de tensão, como os reguladores de tensão, não são suficientes, pois estes equipamentos possuem um tempo de resposta maior que os transitórios que ocorrem no sistema.

A aplicação dos capacitores em série com a carga, apresenta uma resposta instantânea, e, portanto, se torna uma boa solução técnica e econômica para os problemas de fluxo de potência e regulação de tensão.^{18,20}

Os problemas relacionados na literatura técnica sobre à compensação série trata-se da ressonância subsíncrona, ferroressonâncias e a variação periódica da velocidade síncrona do rotor de motores e geradores, durante a operação em regime permanente. Atualmente, a utilização da compensação série em sistemas de subtransmissão e distribuição é uma filosofia que se apresenta como alternativa para a melhoria da qualidade da energia elétrica, principalmente devido à evolução dos sistemas de proteção.

O desenvolvimento de sistemas flexíveis para interligações e aumento da margem de estabilidade tornou-se tecnicamente possível em função da evolução dos dispositivos a base de eletrônica de potência aplicada em sistemas de alta tensão. A filosofia de compensação série em sistemas de transmissão possibilita o aumento da margem de estabilidade tanto em regime permanente como transitório. Em níveis de alta e extra-alta tensão tem-se uma confiabilidade comprovada através de inúmeros sistemas em operação.

A utilização desta técnica em sistemas de distribuição também tem apresentado inúmeros benefícios, sendo que muitos projetos comprovam, técnica e economicamente, as vantagens sobre o sistema convencional com reguladores de tensão e capacitores de derivação. Devido às vantagens apresentadas, a compensação série abre nova perspectiva para as empresas de distribuição no que tange à disponibilidade de um poderoso instrumento, capaz de auto-regular a tensão nas linhas e aumentar a capacidade de transporte de energia através da redução das perdas, com confiabilidade e a baixo custo.^{21,22}

Neste capítulo foram apresentados os diferentes dispositivos FACTS e a classificação dos mesmos. Foi dado grande enfoque no compensador série, já que, para o estudo de caso que será apresentado no Capítulo 6, o mesmo será implementado com uma rede de comunicação entre o centro de controle e a rede de distribuição. Essa rede de comunicação permite que, através do monitoramento dos dados de tensão e corrente do compensador série em tempo real, o centro de controle pode garantir um melhor funcionamento do mesmo. É importante destacar que este tipo de comunicação será feita utilizando a filosofia de SG e, no Capítulo seguinte, serão apresentados os aspectos de comunicação de SG.

3 ASPECTOS DE COMUNICAÇÃO EM REDES INTELIGENTES

3.1 Introdução

O termo de *Smart Grid* foi usado pela primeira vez em um artigo escrito por S. Massoud Amin e Bruce F. Wollenberg, que foi publicado em setembro e novembro de 2005 na revista IEEE P&E, com o título de “*Toward a Smart Grid*”

Há muito tempo a filosofia da operação do sistema elétrico está tentando se expandir com o objetivo de responder às necessidades da crescente demanda. A experiência tem mostrado que o controle da rede hierárquica de anos anteriores tem melhorado significativamente a eficiência e a confiabilidade da rede dos anos atuais. É por isso que, para abordar os desafios da rede elétrica eficiente, surge o novo conceito chamado SG ou Rede Inteligente. Considera-se que isso seja o moderno sistema elétrico de potência baseado em uma nova infraestrutura que engloba por meio de controle e automação elementos de uma eficiente utilização da rede, conversores de alta potência e modernas infraestruturas de comunicação.³⁸

Smart Grids é caracterizada pela integração e aplicação das novas tecnologias de comunicação e informação digital em diferentes ambientes computacionais, junto com a visualização e monitoramento do seu alcance de gerenciamento nos dispositivos de controle e as consequências dos mesmos nas redes de energia elétrica. Visa-se gerenciar de forma eficiente todos os recursos da geração, os sistemas de transmissão, distribuição e as instalações do cliente, obtendo assim resultados de aproveitamento de energia elétrica positivos para o desenvolvimento sustentável em termos de impacto no sistema, pela entrada de novas tecnologias e uma capacidade maior da alocação do considerável crescimento da demanda.

A função de uma rede elétrica não é uma entidade única, pois é um conjunto de entidades de múltiplas redes e múltiplas empresas de geração de energia com múltiplos operadores que utilizam os diferentes níveis de comunicação e a coordenação para operar de forma eficiente, contínua e confiável a rede. No cenário de SG, uma inovadora e penetrante infraestrutura de comunicação é crucial para sua construção e operação com diferentes e importantes elementos do sistema elétrico de potência atual.

SG então pode ser considerada como uma moderna infraestrutura da rede elétrica que tem como objetivo o aumento da eficiência e confiabilidade através de controle, automação, conversores de alta potência, infraestrutura de comunicação moderna, tecnologias de detecção e medição, e as técnicas modernas da gestão da energia baseadas na otimização da demanda, disponibilidade e resposta em tempo real.

Este capítulo apresenta uma abordagem básica da filosofia de SG para gerenciar a implantação dos sistemas de comunicação nos níveis hierárquicos do sistema elétrico de potência, com o objetivo de apresentar a filosofia implantada para o estudo do esquema de comunicação desenvolvido neste trabalho.

3.2 Rede inteligente (*Smart Grid*)

Existem muitas definições para o conceito de SG, mas todas convergem para o uso de elementos digitais e de comunicações nas redes de energia elétrica. Estes elementos possibilitam o envio de uma gama de dados de informação para os centros de controle, onde eles são tratados, auxiliando na operação e controle do sistema como um todo.

Pode-se observar que a comunicação para a rede inteligente é muito importante já que a mesma vai gerenciar um padrão bidirecional das concessionárias ao cliente e vice-versa. É por isso que vamos abordar com maior profundidade o tema da comunicação.

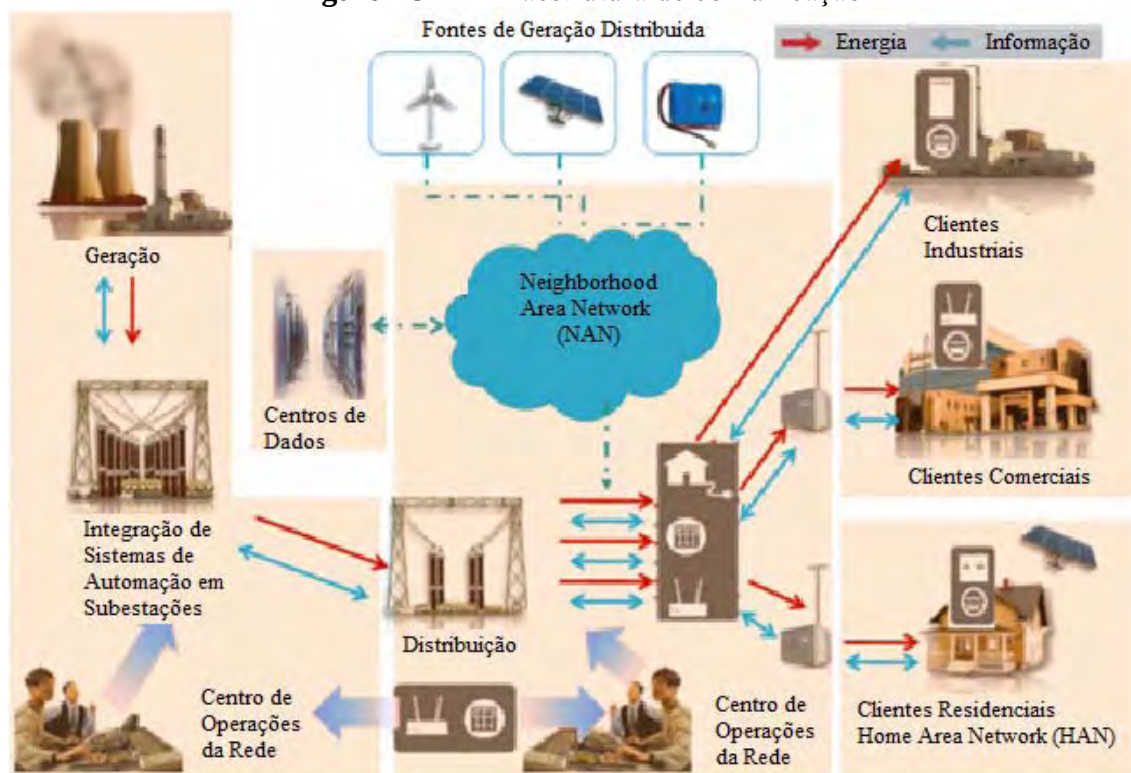
A infraestrutura atual do sistema elétrico está envelhecendo rapidamente, comparado com a taxa de crescimento da população e, como consequência da demanda em termos de energia. Além disso, ela torna-se cada vez mais complexa, já que a maior parte das soluções é para problemas em curto prazo em cada uma das áreas que constituem o sistema elétrico. A consequência é a falta de resposta à entrada de novas tecnologias. Entre estas deficiências estão: a falta de análise e desenho para automação, tempos de resposta lentos atribuídos a chaves mecânicas, falta de operações na hora certa, faltas nos equipamentos, problemas de armazenamento, limitações na geração, perda da capacidade do sistema pelo gerenciamento desequilibrado da energia e comunicação unidirecional, etc.⁴³

Torna-se necessário um novo conceito da rede para atender de maneira controlada e comunicativa os crescentes elementos que estão identificados como consequências de aumento da demanda, conceito que hoje em dia emerge chamado de SG.³⁹ Ele cria a capacidade na rede atual de integrar novas tecnologias como fontes de energia renováveis e alternativas, as quais tem um aporte significativo relativo à diminuição do consumo de

combustíveis fósseis e a geração de gases efeito estufa. A visão desta nova rede tem como objetivo realizar uma gestão ótima no momento de integrar estes novos tipos de geração de energia com enfoque em redução de perdas, confiabilidade do sistema, eficiência e segurança ao fornecimento de eletricidade aos clientes finais. Esta gestão pode ser feita através de um dos elementos mais importantes que compõe SG, como é a capacidade da comunicação entre os elementos que compõem o sistema elétrico.

Em geral, as tecnologias SG para comunicação estão agrupadas em cinco áreas chaves: dispositivos avançados, leitura e retenção, interfaces melhoradas, suportes de decisão, normatividade e comunicações integradas. Na Figura 18, apresenta-se um exemplo genérico da infraestrutura de comunicação em SG, a qual inclui redes de áreas residenciais (*Home Area Networks* - HAN), áreas comerciais, áreas de vizinhança ou de bairro (*Neighborhood Area Networks* - NAN), centros de dados e sistemas de integração para automação da subestação.

Figura 18 — Infraestrutura de comunicação



Fonte: Omar Guenul⁴³

3.3 Interoperabilidade

É a capacidade de o sistema se comunicar de forma transparente com outro sistema. Por isso, é recomendável que eles trabalhem com padrões abertos de comunicação.

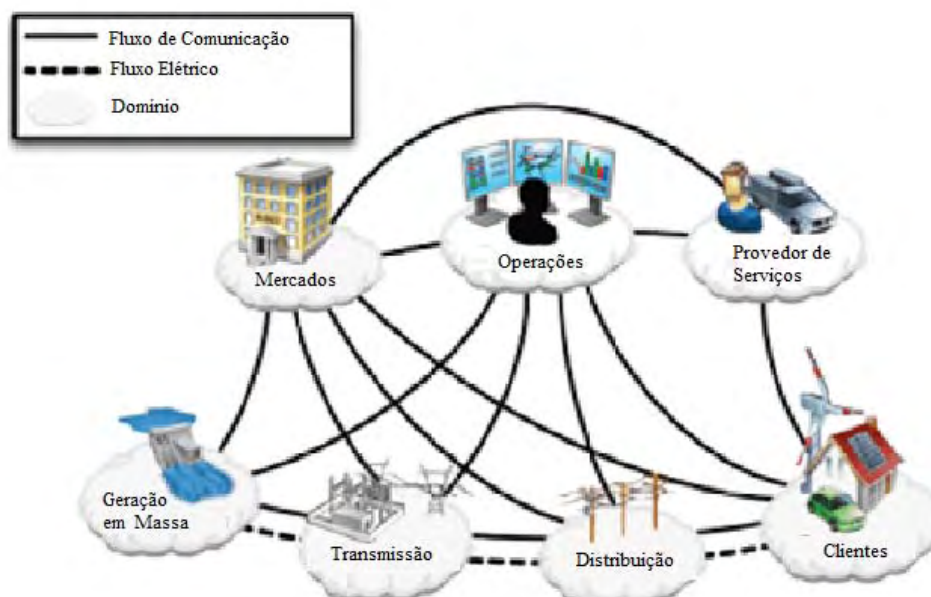
O uso de protocolos comuns entre vários equipamentos é uma condição desejável para que se obtenha uma maior competitividade no setor. Os padrões proprietários sempre trazem consigo uma elevação nos preços e criam monopólios que são prejudiciais à modicidade tarifária.

O instituto nacional de padrões e tecnologia americana (*National Institute of Standards and Technology* - NIST) vem trabalhando no sentido de que protocolos internacionais já existentes venham a ser utilizados nas redes inteligentes. Por isso, foi criado um painel para interoperabilidade das redes inteligentes. Ele é integrado por setores do governo, comitês de padronizações, grupos de trabalhos, equipes de ações prioritárias. Todos trabalhando em conjunto objetivando as melhores soluções para que se garanta a interoperabilidade da rede.²³

O *roadmap* do NIST foi resultado de gigantesco esforço de representantes do setor, sendo considerado por muitos, um dos principais registros de interoperabilidade na *Smart Grid*. Este trabalho foi suportado por entidades de renome no mundo *Smart Grid*, dentre outras o instituto de pesquisa em energia elétrica (*Electric Power Research Institute* - EPRI) e o Conselho de Arquitetura (*Grid Wise Architecture Council* - GWAC).

O Modelo de Referência Conceitual *Smart Grid* do NIST, citado nos *roadmaps* do IEC e IEEE, provê um *framework* de alto nível com a definição de sete domínios: geração, transmissão, distribuição, consumidores, operações, mercados e provedores de serviço, onde cada um deles pode ser dividido em subdomínios. Domínios e subdomínios incluem atores (dispositivos e softwares que trocam mensagens) e aplicações (gerenciamento de energia). Este *framework* pode ser visualizado na Figura 19, que destaca fluxos de informação e fluxos de energia elétrica entre domínios.

Figura 19 — Interoperabilidade entre domínios de *Smart Grid*



Fonte: European Commission²⁴

3.4 Elementos Tecnológicos de Comunicação

Um sistema de comunicação é um dos componentes chaves para a infraestrutura da rede inteligente. Hoje em dia é de muita importância para as empresas de eletricidade ou concessionárias definir os requisitos de comunicação, e assim, encontrar uma melhor infraestrutura. O objetivo é dirigir os dados de entrada e de saída, como também um serviço confiável, seguro, rentável e econômico ao longo do sistema elétrico.

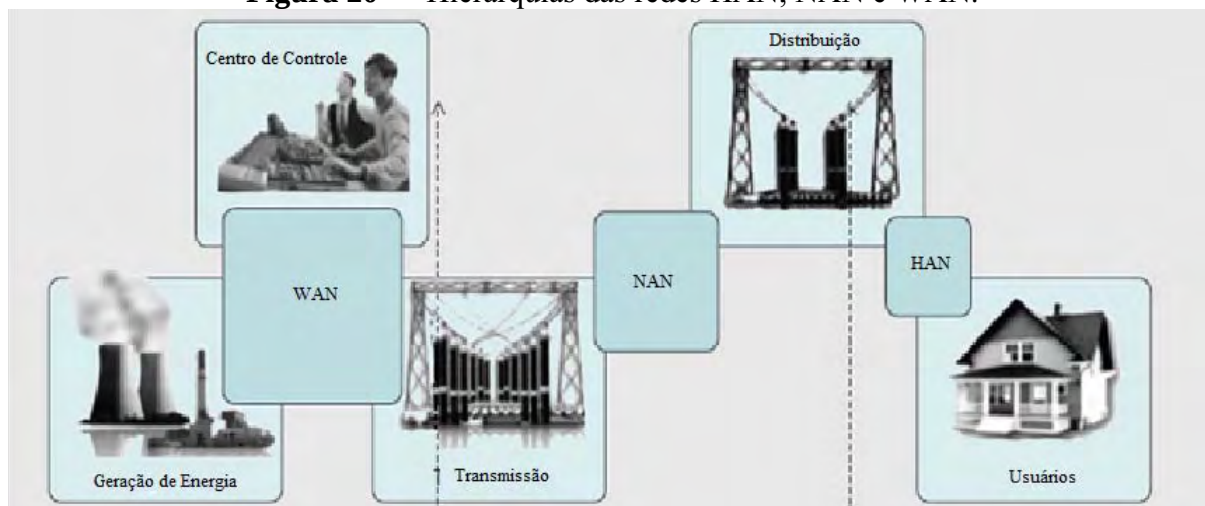
3.4.1 Arquitetura de Comunicação

A arquitetura proposta para a comunicação de SG é composta por três camadas hierárquicas. São elas: HAN, NAN e rede de área ampla (*Wide Area Network* - WAN). Esse tipo de arquitetura é diferente das arquiteturas tradicionais de comunicação. Ela tem como proposta fornecer uma operação potencial.

As comunicações das redes residenciais como são as HAN, comunicam-se com diversos dispositivos inteligentes, dentro de uma casa, com objetivo de ter uma medição inteligente é uma gestão da energia nas instalações do consumidor. Redes vizinhas de área NAN estão conectadas a diversas HAN com pontos de acesso locais para enviar dados a um

concentrador de dados, e a rede de área ampla WAN, a qual tem uma conexão de comunicação entre as NAN e os sistemas de serviço público para transferir a informação desejada. Na Figura 20 apresentam-se as hierarquias das redes HAN, NAN e WAN.

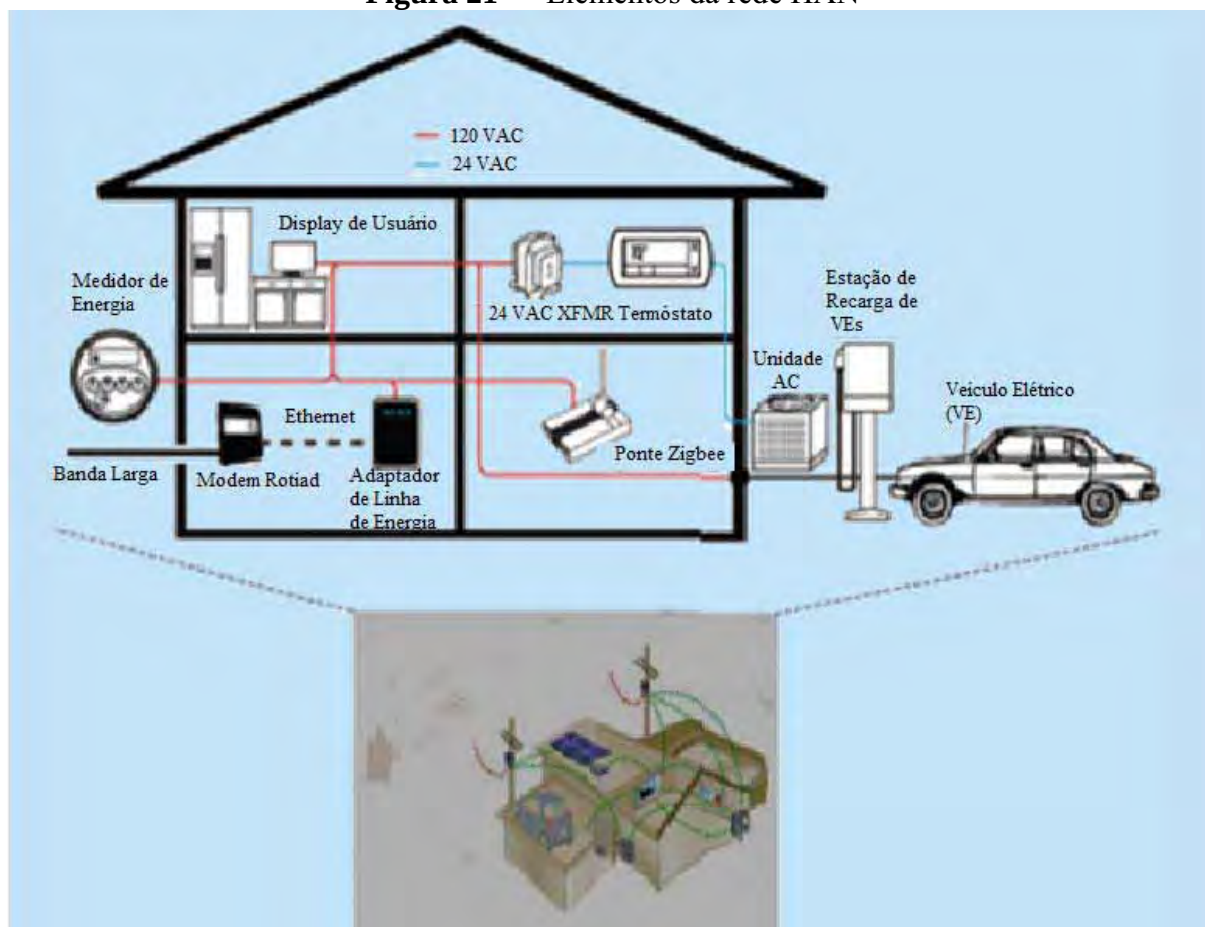
Figura 20 — Hierarquias das redes HAN, NAN e WAN.



Fonte: Shreyas⁴²

3.4.1.1 Rede HAN

Uma variedade de dispositivos serão integrados tais como: termostatos controles de iluminação, *displays* de energia, eletrodomésticos, veículos elétricos *plug-in* e outros recursos de energia como a energia fotovoltaica ou eólica. Dispositivos de armazenamento de energia, tais como, aparelhos com baterias serão conectados na interface de medida inteligente com objetivo de monitorar e controlar o consumo de energia e a geração. Inicialmente, os consumidores poderão necessitar de um novo dispositivo chamado roteador. Este deve ser conectado em um medidor inteligente em um lugar do sistema de gestão e deve ser localizado dentro da casa por meio de um provedor externo que vai proporcionar um *software* para comunicações de duas vias, ou seja, conexão bidirecional. Na Figura 21mostram-se os diversos elementos da rede HAN.⁴¹

Figura 21 — Elementos da rede HAN

Fonte: Shreyas⁴²

As opções de tecnologias para a criação de redes HAN, inclui banda larga sobre linhas de potência de comunicação (*Power Line Communication* - PLC). Uma tecnologia que está sendo testada para fornecer serviço de internet banda larga através de linhas de energia é o *ZigBee* baseada no padrão IEEE 802.15.4, as quais são redes de comunicação sem fio. As novas tecnologias de comunicações emergentes tentam alcançar velocidades de picos dos dados de várias centenas de *Mega Bytes* por segundo, com o objetivo de dar o melhor suporte de áudio e aplicações de multimídias.

Em geral, são utilizadas técnicas avançadas de modulação tal como a modulação por divisão ortogonal de frequência (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing* - OFDM), que foi demonstrado para ambientes ruidosos com a linha de alimentação enquanto alcança a estabilidade.

O PLC é uma opção atraente que não requer uma nova infraestrutura, no entanto, ele não tem obtido êxito dentro de estabelecimentos de zonas urbanas.

No final dos anos 80, observa-se que a última milha da linha telefônica fixa utilizava só uma fração de banda larga disponível no par trançado, isto levou à invenção da tecnologia

de transmissão digital de dados (*Digital Subscriber Line* - DSL) o qual mostrou as diferentes frequências antes inutilizadas para oferecer acesso à banda larga. A eletricidade é transmitida de maneira padrão em uma frequência de 50 Hz ou 60 Hz.

De acordo com as pesquisas, percebeu-se que existe toda a faixa de frequência da linha livre. Surge a idéia de tentar utilizar a faixa de frequências livres da linha com o propósito de transmitir dados, como no caso da linha telefônica. Consequentemente, propõe-se a transmitir os dados das frequências utilizadas nas linhas de tensão usando os métodos similares ao usados por DSL. Essa foi a idéia de construir a tecnologia BPL onde ela tem velocidade de até 13 Mbps Jamian et al.⁴⁰

A tecnologia mais conveniente para conectar em casa é a sem fio que é a *ZigBee* definida na interface de comunicação IEEE802.15.4. É baseada no padrão para automação residencial e aplicações que utiliza a banda sem licença industrial, científica e médica de 2.4 GHz. Ela é composta de ligação do transceptor e camadas de enlace de dados (camada física e protocolos) que permitem transmissão de até 250 kbps. Vários experimentos mostram sua capacidade para coexistir com interferências na faixa 2,4GHz de frequência, sinais tais como *bluetooth* *the Wireless Fidelity* (Wi-Fi ou 802.11). O protocolo de controle de acesso ao meio (*Medium Access Control* - MAC) é um mecanismo eficaz para poupar energia para a durabilidade.

O desenvolvimento da tecnologia *ZigBee* no contexto industrial tem sido produtivo para o posicionamento dessa tecnologia para ser utilizada em redes internas as casas, a qual tem uma rota definida de integração para a gestão de energia baseada em sistemas IP assim como para a interoperabilidade com a tecnologia de comunicações através da rede elétrica (*Power Line Communication* - PLC).

3.4.1.2 Rede NAN

As redes NAN são um tipo de redes móveis de comunicação que dirige pacotes de dados. A rede NAN vai permitir que as informações de cada casa ou residência possam ser direcionadas a centros de gestão e controle, estabelecendo um completo mecanismo de gestão individualizado para o consumidor. As redes inteligentes NAN tem um papel muito importante a desempenhar na comunicação da casa à rede. Limitando nosso alcance de discussão com os requisitos da rede local NAN, requer maior largura de banda que vai desde os 10 kbps até os 100 kbps, para assim poder chegar às leituras dos medidores, a resposta de

demanda, desconexão remota e outras funções. Um dos requisitos principais consiste em apoiar a criação das redes malhadas, já que a rede necessita cobrir milhares de casas, essencialmente, cobrindo mais de alguns quilômetros quadrados. Estas redes também fornecem baixa taxa de transmissão, tipicamente menos de dez segundos, como sinais de controle que são parte da comunicação em dois sentidos.⁴²

No futuro, este tipo de tecnologia poderá detectar situações de falta de energia elétrica em cada cliente, corte e reconexão ou aplicar tarifação diferenciada. Esses são apenas alguns exemplos.

3.4.1.3 Rede WAN

As redes WAN são de áreas geográficas muito extensas, mais conhecidas como redes de área ampla, estas contêm uma coleção de máquinas dedicadas a executar programas de usuário (aplicações). Tais máquinas são chamadas de *hosts* e estão interconectadas através de internet. Os *hosts* estão conectados por uma sub-rede de comunicação. O trabalho das sub-rede é enviar mensagem de um *host* a outro.

Em muitas redes de área ampla a sub-rede tem dois componentes distintos: as linhas de transmissão e os elementos de comutação. As linhas de transmissão também chamadas de circuitos ou canais que transportam os bits de uma máquina a outra. Os elementos de comutação são computadores especiais, que conectam duas ou mais linhas de transmissão. Quando os dados chegam por uma linha de entrada os elementos de comutação devem escolher uma linha de saída para enviá-los. Os computadores de comutação são chamados roteadores.

O Departamento Nacional de Energia nos EUA (*US Department of Energy* - DOE) e o Laboratório Nacional de Energia e Tecnologia (*National Energy Technology Laboratory* - NETL), escreveram um texto chamado “Uma visão dos sistemas modernos de SG”, onde são identificados os seguintes pontos: Comunicações integradas, medida, componentes avançados, métodos avançados de controle, suporte de decisão e interfaces. O foco desta aplicação esta baseado na rede WAN, e como destaca NETL, este tipo de rede traz muitos benefícios ao sistema, já que vai permitir converter as comunicações em um sistema integrado, e consequentemente criara um meio dinâmico e iterativo em tempo real da informação e intercâmbio de energia.

3.4.2 Tipos de tecnologias

Existem diferentes tecnologias de comunicação que suportam os dois principais meios de comunicação, que são sem fio e por cabo. Estas podem ser utilizadas para a transmissão dos dados. Em alguns casos, a comunicação sem fio tem algumas vantagens sobre as tecnologias por cabo, por exemplo: a infraestrutura de baixo custo, a facilidade em lugares inalcançáveis e de difícil área de conexão. Porém, a natureza do caminho de transmissão pode causar atenuação do sinal. Por outro lado, as soluções por cabo não têm os problemas de interferência e uma das grandes vantagens é que as funções não são dependentes de baterias, como as soluções sem fios.

A escolha da tecnologia que se encaixa em um ambiente, pode não ser adequado para o outro tipo de ambiente. No entanto, existem importantes fatores limitantes que devem ser tomados em conta no processo de medição inteligente na hora de ser implantados, tais como: custos operacionais, disponibilidade da tecnologia, tempo de implantação e meio ambiente como área rural, urbana, etc.⁴⁴ Uma visão geral das tecnologias de comunicação podem ser encontradas no Quadro 1.

Quadro 1— Tipos de tecnologias.

TIPO DE REDE	ALCANCE	REQUERIMENTOS DE TAXA DE DADOS	TIPO DE TECNOLOGIA QUE PODE SER UTILIZADA
HAN	Dezenas de Metros	Depende da aplicação, geralmente baixo controle de informação por bit.	ZigBee, Wi-Fi, Ethernet, PLC
NAN	Centenas de metros	Depende da densidade do nó na rede, por exemplo, 2Kbps, no caso de envio de 500 medidas enviando 60 bytes de dados medidos a cada dois minutos por NAN	ZigBee, Wi-Fi, PLC, celular
WAN	Dezenas de quilômetros	Dispositivo de alta capacidade, como um roteador de alta velocidade /interruptor (algumas centenas de Mbps para um ou poucos Gbps)	Microonda, WiMax, 3G/LTE, Fibra ótica

Fonte: Fan⁴⁴

A seguir, algumas das tecnologias de rede inteligente de comunicações são brevemente explicadas.

3.4.2.1 ZigBee

ZigBee é uma tecnologia de comunicação sem fio, que apresenta baixo consumo de energia, taxa de dados, complexidade e custo da implementação. É uma tecnologia ideal para a iluminação inteligente, controle da energia, leitura automática dos contadores e para automação residencial, etc.

ZigBee tem 16 canais na faixa de operação de 2,4 GHz, cada um com 5 MHz de largura de banda. A potência de saída máxima é de 1 mW dos aparelhos de rádio com uma distancia no enlace de transmissão entre 1 e 100m, com 250 kbps da taxa de dados. É considerada uma boa opção para a medição e gestão de energia.

É ideal para implementação de redes inteligentes, juntamente com a sua simplicidade, robustez, mobilidade, requisitos de largura de banda baixa, baixo custo de implantação, a sua operação dentro de um espectro não licenciado, implementação de rede fácil, sendo padronizado por protocolo baseado no padrão IEEE 802.15.4.

ZigBee tem algumas restrições para implementações práticas, tais como: as capacidades de processamento baixas, tem tamanho de memória pequena, de media para alta latência de frequência e as vezes está sujeito a interferência com outros aparelhos que compartilham do mesmo meio de transmissão. Portanto, apesar da robustez do ZigBee, as condições de ruído aumentam a possibilidade de danificar o canal de comunicação.

3.4.2.2 Celular

As redes de telefonia celular pode ser uma boa opção para a comunicação entre os contadores inteligentes, serviços públicos e entre os pontos de medida. A atual infraestrutura de comunicações evita o acréscimo de custos operacionais e o tempo adicional para a construção de uma nova infraestrutura de comunicação. Soluções para a rede celular, possibilitam uma implementação de medição inteligente que se estende a um meio de área ampla.

Algumas tecnologias de comunicação disponíveis para os serviços públicos de medição inteligente são: 2,5G; 3G, Interoperabilidade Mundial para Acesso de Micro-ondas (*Worldwide Interoperability for Microwave Access*- WiMAX) e evolução a longo prazo (*Longterm evolution* - LTE). O medidor de energia está integrado por módulos de Serviço de Rádio de Pacote Geral (*General Packet Radio Service* - GPRS) e eles se comunicam com um servidor que administra o sistema.

Podemos dizer que as redes celulares já existem, por tal motivo é muito mais fácil utilizar elas, devido aos seus benefícios, tais como, os custos de implementação, o que faz dela uma das principais tecnologias de comunicação no mercado. Devido à coleta de dados em intervalos menores, uma enorme quantidade de dados será gerada e as redes celulares fornecerão largura de banda suficiente para tais aplicações.

Em relação à segurança, entram em discussão, se as redes celulares estão prontas para garantir as transmissões de dados com controles de segurança forte. Para gerenciar a comunicação com os medidores inteligentes nas áreas urbanas ou rurais e a implantação de área de ampla capacidade, a segurança torna-se uma componente chave, uma vez que as redes celulares têm atingido cobertura em quase 100%. Além disso, a tecnologia Sistema Global para Comunicações Móveis (*Global System for Mobile Communication* - GSM) realiza até 14,4 kbps e a tecnologia GPRS realiza até 170 kbps.

Em algumas redes de energia com aplicações críticas, é preciso de disponibilidade contínua de comunicação, no entanto, os serviços de redes celulares são compartilhados pelo mercado de consumidor público que pode resultar no congestionamento da rede e diminuição no desempenho da mesma em situações-chaves para a rede inteligente.

3.4.2.3 Comunicação em Linhas de Potência (PLC)

PLC é uma técnica que utiliza as linhas elétricas existentes para transmitir sinais de dados de alta velocidade (2-3 Mbps) de um dispositivo a outro. PLC tem sido a primeira opção para a comunicação dos medidores, pois existem implementações bem sucedidas de Infraestrutura de Medidores Avançados (*Advanced Metering Infrastructure* - AMI) em áreas urbanas, onde outras soluções procuram satisfazer às necessidades dos serviços públicos.

PLC pode ser considerada como uma tecnologia promissora para aplicações de redes inteligentes devido ao fato de que a infraestrutura existente diminui o custo de instalação da infraestrutura de comunicação.

Por outro lado, a tecnologia PLC pode ser bem adequada para zonas urbanas com aplicações de redes inteligentes, como são, os medidores inteligentes, o monitoramento, e as aplicações de controle, já que a infraestrutura PLC cobre as áreas que estão na gama do território de serviço de companhias públicas.⁴⁵

O meio de transmissão através da linha de alta tensão é um ambiente hostil e ruidoso que torna difícil o canal a ser modelado. A característica de baixa largura de banda (20 kbps para redes de área local) restringe a tecnologia PLC de 2-3 Mbps para aplicações que necessitam de maior largura de banda.

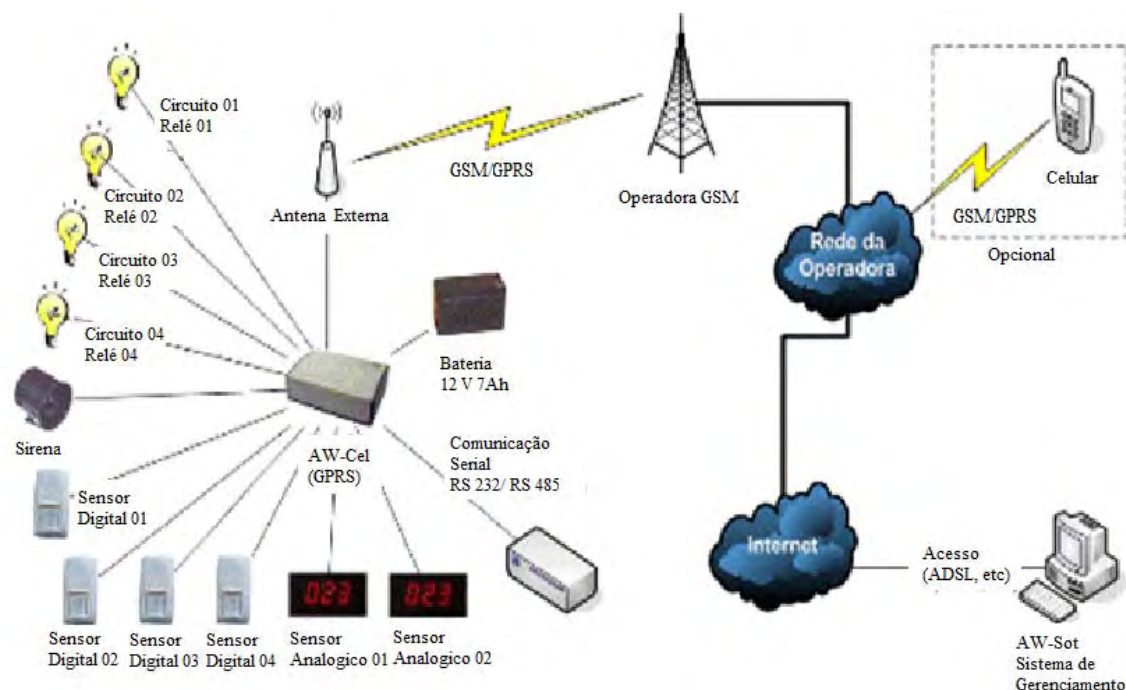
3.5 Tecnologia (GPRS)

O GPRS é uma tecnologia que aumenta as taxas de transferência de dados nas redes GSM existentes. Esta permite o transporte de dados por pacotes (Comutação por pacotes). Sendo assim, o GPRS oferece uma taxa de transferência de dados muito mais elevada que as taxas de transferência das tecnologias anteriores, que usavam comutação por circuito, que eram em torno de 12 kbps. Já o GPRS, em situações ideais, pode ultrapassar a marca dos 170 kbps.

No GPRS, o serviço é sempre ativo, ou seja, ele é um modo no qual os recursos são atribuídos a um usuário quando for necessário enviar ou receber dados. Esta técnica permite que vários usuários compartilhem os mesmos recursos, aumentando assim a capacidade da rede e permitindo uma gerência razoavelmente eficiente dos recursos. Isto permite às operadoras GPRS disponibilizar acesso à internet móvel em alta velocidade e a um custo razoável, pois a cobrança é feita pela quantidade de pacotes de dados transmitidos e não pelo tempo de conexão à rede.⁴⁶

Com o GPRS, a informação é dividida em pacotes relacionados entre si antes de ser transmitida e remontada no destinatário. A comutação de pacotes é semelhante a um jogo de quebra-cabeças, onde cada peça do quebra-cabeça seria um pacote, os quais são enviados um a um até formar a imagem final, ou seja, todas as peças são relacionadas entre si e se encaixam, mas a forma como são transportadas e remontadas varia. A internet é um exemplo de rede de dados baseada em comutação de pacotes, sendo o mais famoso de muitos tipos de rede. Observa-se na Figura 22 a configuração de tecnologia GPRS.

Figura 22—Tecnologia GPRS



Fonte: Bettstetter, Vögel, e Eberspächer.⁴⁶

Para usar GPRS, os usuários precisam especificamente de:

- Um telefone móvel ou terminal que suporte GPRS.
- Uma assinatura em uma rede de telefonia móvel que suporte GPRS.
- Ter o uso de GPRS habilitado. Acesso automático ao GPRS pode ser permitido por algumas operadoras; outras poderão requerer uma opção específica de adesão.
- Um destino para enviar ou um local de onde receber informações através do GPRS.

Uma das principais vantagens do GPRS são sua ampla cobertura em todas as unidades, o acesso imediato para os dados já que uma vez estabelecida a conexão estará permanentemente ativa, além de outros benefícios, uma taxa de transmissão que na prática pode chegar até 40 kbps e uma tarifação que pode ser baseada no volume da informação trafegada.⁴⁷

As especificações GPRS definem três classes de terminais:

Classe A: Terminais que podem tratar voz e dados ao mesmo tempo.

Classe B: Terminais que podem tratar voz e dados, mas não ao mesmo tempo.

Classe C: Terminais que podem tratar apenas dados, como cartões GPRS para computadores portáteis.

Devido ao alto custo dos terminais Classe “A”, a maior parte dos terminais lançados comercialmente é de classe B.⁴⁸

Para o estudo de caso que será apresentado no Capítulo 5 utilizaremos a classe C, já que a comunicação do compensador série será apenas uma transmissão de dados e não de voz. Essa comunicação é feita utilizando comutação por pacotes.⁶³

3.6 Detalhamento de Padrões e Tecnologias de Comunicação

A seleção de padrões e de tecnologias de comunicação é um dos principais desafios na concepção de uma *Smart Grid*, uma vez que é necessário considerar a convergência de diversas aplicações. Principalmente nas redes de distribuição, já que estas exigem especificações mais rigorosas, como a maior disponibilidade de rede e menor tempo de resposta na decisão de eventos críticos, como em situações de interrupções de fornecimento de Energia elétrica.

Os protocolos e padrões significativos à automação dos sistemas elétricos principalmente os de distribuição são aqueles que implementam os sistemas de (*Supervisory Control and Data Acquisition* - SCADA) que vem sendo tradicionalmente aplicados aos Sistemas Elétricos Potência. Dentre os mais importantes, podem ser citados o DNP3, IEC 60870-5-101/104, *modbus*, IEC 61850, ICCP (IEC 60870-6/TASE.2) e IEC 62351 Parts 1-8 (padrão de segurança em operações de controle).²⁵

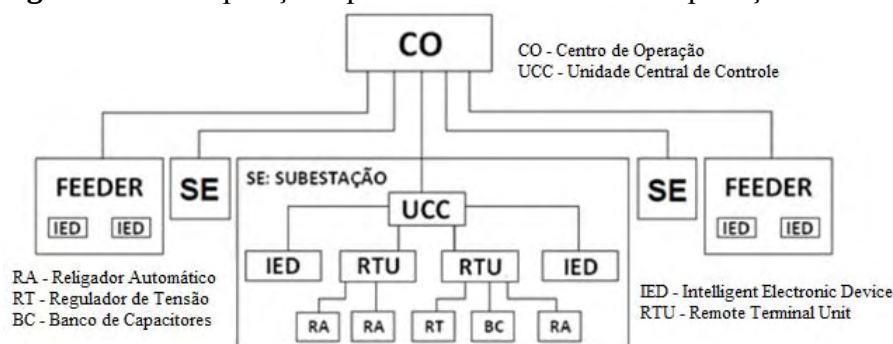
3.6.1 DNP3

O DNP3 (*Distributed Network Protocol version 3*) é um padrão de comunicação que serve de suporte à automação do setor elétrico, com utilização tanto na distribuição quanto na transmissão. Referenciado como IEEE 1815-2010, o DNP3 surgiu em 1990 e passou ao domínio público em 1993, tornando-se um padrão aberto, com o desmembramento do padrão IEC 60870-5-1, adaptando-o às exigências norte-americanas. O DNP3 define um conjunto de procedimentos para a implementação de enlaces de comunicação SCADA entre estações mestres e unidade terminais remotas (*Remote Terminal Units* - RTUs), ou dispositivos eletrônicos inteligentes (*Intelligent Electronic Devices* - IEDs).

RTUs são dispositivos eletrônicos microprocessados que atuam como interfaces de equipamentos de energia elétrica para comunicação com sistemas de controle distribuídos (sistemas SCADA), transmitindo dados de telemetria de equipamentos ao servidor e alterando o estado desses equipamentos utilizando mensagens de comando enviadas pelo servidor. IEDs são dispositivos eletrônicos microprocessados que controlam equipamentos elétricos.

IEDs típicos são *load tap changer controllers*, *digital protective relays*, *circuit breaker controllers*, *capacitor bank switches*, *recloser controllers* e *voltage regulators*. A Figura 23 mostra uma disposição típica de RTUs e IEDs em aplicação SCADA.

Figura 23 — Disposição típica de RTUs e IEDs em aplicação SCADA



Fonte: ABB²⁶

O DNP3 é um protocolo disposto em camadas, baseado na camada física, enlace e aplicação (*Enhanced Performance Architecture -EPA*), do IEC, e ele foi projetado para operações SCADA a baixas taxas de transmissão em ambientes hostis como os encontrados no sistema elétrico de potência. O DNP3 implementa quatro camadas (uma “pseudo camada” de transporte é inserida entre as camadas de enlace e de aplicação) para prover funções complementares, como fragmentação de mensagens da camada de aplicação. O DNP3 utiliza tipicamente interface física serial (RS-232 ou RS-485), no entanto, em aplicações recentes têm sido utilizados outros métodos de transmissão, tais como ethernet, fibra ótica, rádio, satélite, entre outros. No entanto, implementações com conexões ethernet (**DNP3 LAN**) têm sido utilizadas em aplicações recentes.

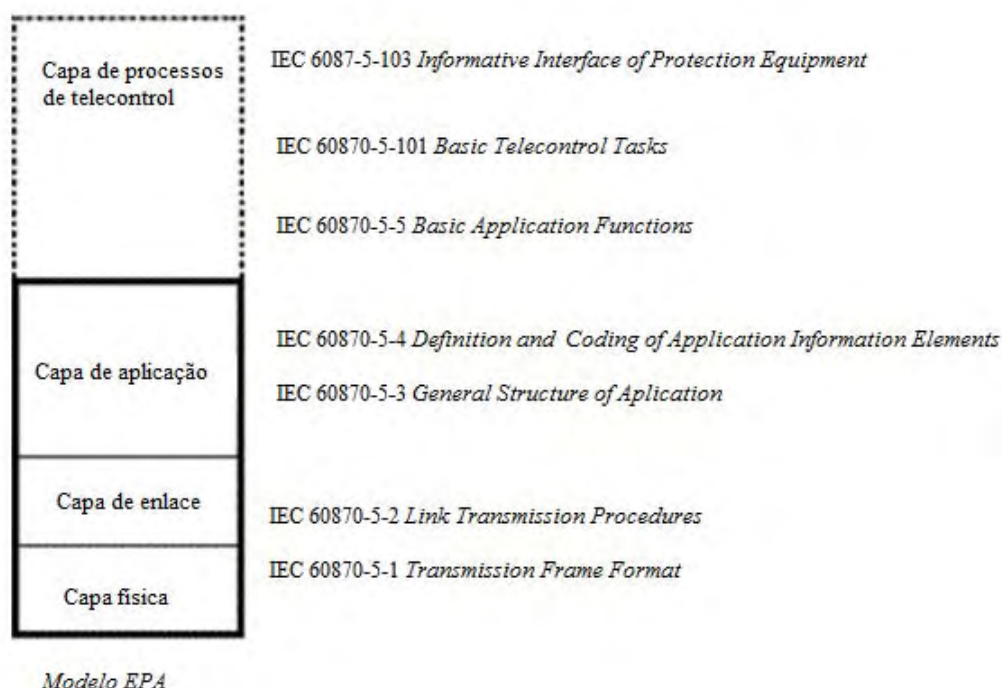
O DNP3 não possui restrições, e apresenta atributos necessários para uso em uma *Smart Grid*. Então, deve-se considerar formas de aproveitamento visando a integração com equipamentos da rede (equipamentos DNP3), por exemplo, através do estabelecimento de mapeamentos deste com padrões mais alinhados à *Smart Grid*, como é o caso do IEC 61850. Ainda, pelo fato do DNP3 utilizar semântica menos específica que o IEC 61850, o mapeamento entre os dois será apenas aproximado. Por fim, a integração de ambos (DNP3 e

IEC 61850) deve ocorrer através da inserção de módulos de software (*gateways*) nos lados mestre/cliente.

3.6.2 IEC 60870-5

O IEC 60870-5 é o padrão internacional desenvolvido pelo IEC para telecontrole e teleproteção, isto é, voltado às aplicações de automação na distribuição, provendo funcionalidades similares ao DNP3 (pode ser considerado o DNP3 Europeu). O padrão **IEC 60870-5-101** (1995) é um padrão contendo detalhes e aspectos específicos da aplicação, especificando um protocolo de três camadas, para comunicação serial, com variadas habilitações, como por exemplo, o envio de mensagens de reconhecimento e o registro do histórico de eventos na estação mestre. O modelo EPA é mostrado na Figura 24, igual ao DNP3.

Figura 24 — Modelo EPA



Fonte: Brasil²⁷

Assim como o DNP3, o IEC 60870-5-101 permite sincronização de tempo, definição de dados com diferentes níveis de prioridades e reportagem espontânea de dados sem solicitação da estação mestre, característica essencial em aplicações da automação da distribuição que ficam inertes por longos períodos de tempo, mas que devem informar a falha ao mestre imediatamente após a sua ocorrência.

O IEC 60870-5-101 é um padrão aberto amplamente utilizado na Europa, sendo raramente encontrado nas Américas devido a difusão do DNP3 nessas regiões. O padrão **IEC 60870-5-104** é uma extensão do IEC 60870-5-101 com extensões a LANs e a roteadores, permitindo acesso a WANs. O padrão IEC 60870-5-103 foi projetado especificamente para comunicação com dispositivos de proteção.^{23,27}

3.6.3 *Modbus*

Modbus foi desenvolvido no setor de controle de processos, em 1979. Foi originalmente concebido como uma maneira simples de transferir dados entre controles e sensores, por meio de interfaces RS-232 e RS-485. Atualmente, o *modbus* suporta outros meios de comunicação, incluindo TCP/ IP. Robusto, caracteriza-se como padrão de comunicação na indústria, interligando grande número de pequenos dispositivos. Suas versões incluem interface serial e ethernet, assim como interface para outras redes que suportam o protocolo IP.

Como fator restritivo, o *modbus* não dispõe de um método para representar etiquetas de tempo e também não sincronizar tempos em resoluções de milissegundos, o que dificulta a construção de registros com sequências de eventos (históricos) que poderiam ser utilizados para seguir falhas e proceder a restauração da rede. No entanto, algumas aplicações da automação na distribuição não serão afetadas por estas restrições, como por exemplo, o controle de bancos de capacitores. O *modbus* continua a ser utilizado tanto em subestações quanto na rede de distribuição (circuitos alimentadores) em várias regiões do mundo, principalmente em casos onde as demandas por taxas de transmissão sejam baixas. O Quadro 2 apresenta uma comparação entre atributos do DNP3 e do *modbus*, onde se notam grandes vantagens do DNP3.²⁸

Quadro 2— Resumo de comparação *modbus* e DNP3

CARACTERÍSTICA	MODBUS	DNP3
Domínio aberto	Sim	Sim
Grupo de usuários ativos	Sim	Sim
Comitê técnico ativo	Sim	Sim
Procedimentos de certificação abrangentes	Sim	Sim
Múltiplos tipos de dados	sim	Sim
Formatos de dados padronizados		Sim
Tempo de dados marcado		Sim
Indicadores de qualidade de dados		Sim
Relatório de Exceção		Sim
Relatório de Exceção não solicitado		Sim
Operações de controle		Sim

Fonte: Triangle Micro Works²⁸

3.6.4 IEC 61850

IEC 61850 (*Communications Networks and Systems in Substations*) é um padrão internacional desenvolvido pelo IEC TC 57 suportando comunicação relacionada à automação, propondo uma solução unificada para aplicações dentro de subestações, em sua primeira edição. Apresentando-se como uma evolução dos padrões UCA 2.0 e IEC 60870, o IEC 61850, cuja primeira publicação é de 2002, ainda está sendo alterado para a *Smart Grid* ao integrar sistemas como controle, medição, monitoramento e proteção. O IEC 61850 divide-se em partes, sendo o IEC 61850-5 (*Communication Requirements for Functions and Device Models*) o padrão que estabelece requisitos de comunicação.

A implementação de IEDs tornou-se muito importante na automação de subestações. Dispositivos eletrônicos inteligentes estão realizando todas as funções necessárias dentro de uma subestação moderna. Isto requer uma comunicação eficiente entre os IEDs, o que requer o uso de protocolos de comunicação. Antes que a norma IEC 61850 fosse lançada, diferentes protocolos de comunicação específicos eram utilizados para troca de informações entre os IEDs. Isto significa que, se forem usados diferentes protocolos, a informação deve ser convertida para o protocolo em uso.

O protocolo causa atraso e aumenta a possibilidade de erros no processo de comunicação quando a quantidade de informação cresce, isso pode criar problemas na subestação. O propósito do padrão IEC 61850 consiste em resolver os problemas relacionados com utilização de diferentes protocolos de comunicação através da introdução de um

protocolo de comunicação padronizado. Os principais objetivos da norma são a interoperabilidade dos IEDs cumprindo os requisitos de desempenho da subestação e futuro desenvolvimento tecnológico. O objeto do IEC 61850 não é para padronizar as funções dentro de uma subestação. As funções simplesmente tem que ser definidas, com o objetivo de determinar os seus requisitos para comunicação. A estrutura e a interface de comunicação são específicas das funções. Por conseguinte, o padrão não limita o desenvolvimento de IEDs ou de automação de subestação.

Os modelos de dados definidos pelo IEC 61850 podem ser mapeados em diversos perfis de comunicação visando a troca de dados entre dispositivos IEDs e aplicações. Em especial, são mapeados nos objetos genéricos orientados a eventos na subestação (*Generic Object Oriented Substation Events* - GOOSE), com comunicação horizontal, e na especificação da mensagem do fabricante (*Manufacturing Message Specification* - MMS), com comunicação vertical.

Diferentemente de mensagens MMS, que utilizam camadas intermediárias adicionando retardo à comunicação, as mensagens GOOSE podem ser inseridas diretamente em pacotes ethernet e transmitidas no *modbus* da subestação (daí a transmissão horizontal), criando um mecanismo no qual dados de dispositivos / sistemas são agrupados e transmitidos rapidamente (dentro de 4 ms). O GOOSE se baseia no mecanismo de comunicação conhecido por *publisher-subscriber*, onde o nó emissor (editor) insere (publica) mensagens na rede (em múltiplas) e os nós receptores (assinantes ou subscritores) extraem apenas aquelas de seus interesses, em um esquema de interação que elimina o tráfego de informação, acelerando o processo de comunicação. O desacoplamento entre editores e assinantes proporciona um sistema mais expansível, assim como maior dinamicidade de topologia de rede.

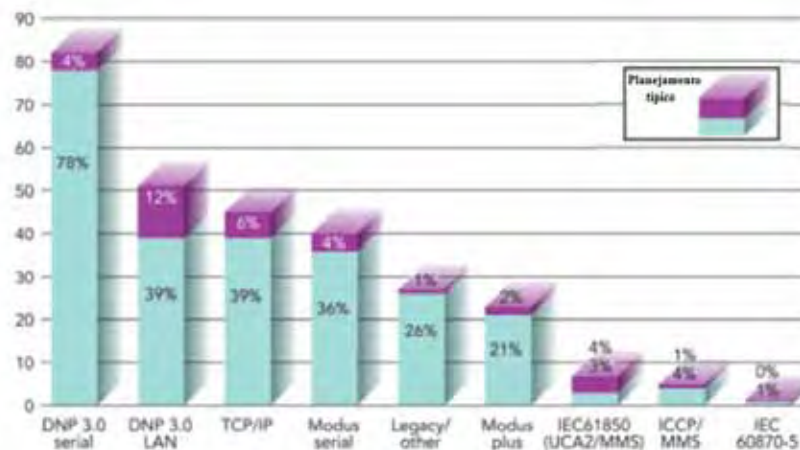
O padrão IEC 61850 define a comunicação, usando o modelo OSI (Interconexão Abertade Sistemas). O modelo OSI é um padrão internacional (ISO / IEC 7498-1) que utiliza o conceito de camadas de funções de comunicação. O modelo contém sete camadas como cada um dos que definiram os requisitos funcionais a fim de criarum sistema de comunicação robusto. O modelo OSI, não especifica quais protocolos devem ser usados a fim de atingir a funcionalidade, nem restringem o soluçãoa um único conjunto de protocolos. Portanto, usando o OSI-modelo do IEC 61850 preserva a possibilidade de mudar os protocolos escolhidos se a tecnologia se desenvolve em uma área em particular. O modelo OSI é ilustradona Figura 25.²⁹

Figura 25 — Modelo OSI

OSI Layer	Protocol		
Layer 7: Application	Application level protocols; MMS, FTP, SMTP, HTTP		Application profile
Layer 6: Presentation			
Layer 5: Session			
Layer 4: Transport	TCP	UDP	Transmission profile
Layer 3: Network	IP		
Layer 2: DataLink	IEEE 802.3 (Ethernet, Fast Ethernet,...)		
Layer 1: Physical			

Fonte: Piirainen²⁹

Em quanto o padrão IEC 61850 tem sido difundido principalmente na Europa, nos EUA apresenta-se como alternativa de menor relevância no mercado. O IEC 61850 tem pouca imersão em aplicações fora do setor elétrico, onde o DNP3 tem boa aceitação. A Figura 26 mostra a participação de padrões dentro de subestações nos EUA, onde nota-se a liderança do DNP3 serial (78%), assim como uma forte expectativa de crescimento do DNP3 LAN (12%). O DNP3 também lidera a participação fora de subestações, com dois terços das aplicações.³⁰

Figura 26 — Padrões mais utilizados

Fonte: Newton³⁰

4 PROTOCOLO DNP3, SCADA E REDE GPRS

Neste capítulo, apresenta-se uma descrição mais detalhada do protocolo que será considerado na metodologia desenvolvida neste trabalho, o qual tem como objetivo padronizar a linguagem de comunicação que será utilizada entre um centro de operações e o acionamento de um dispositivo FACTS com filosofia bidirecional. Como foi discutido no Capítulo 3, o protocolo em questão foi identificado na literatura como o padrão que tem as características mais ajustadas às necessidades, que apresenta a interoperabilidade dos diferentes elementos que compõe o sistema elétrico de potência, considerando que o conceito de interoperabilidade surge da aplicação de SG.

4.1 DNP3

DNP3 (*Distributed Network Protocol*) foi originalmente criado por Westronic, Inc. (now GE Harris) em 1990. Em 1993, a documentação e a especificação do “DNP3.0 básico 4” foi liberado para o domínio público. A propriedade do protocolo foi entregue ao recém-formado Grupo de Usuários de DNP em outubro do mesmo ano. Desde aquela época, o protocolo ganhou aceitação mundial, inclusive ocorreu a formação dos grupos de usuários na China, América Latina e Austrália.

Em janeiro de 1995, o grupo de comissão técnica do DNP3 foi formado para analisar melhorias e recomendar a aprovação do grupo de usuários em geral.⁴⁹

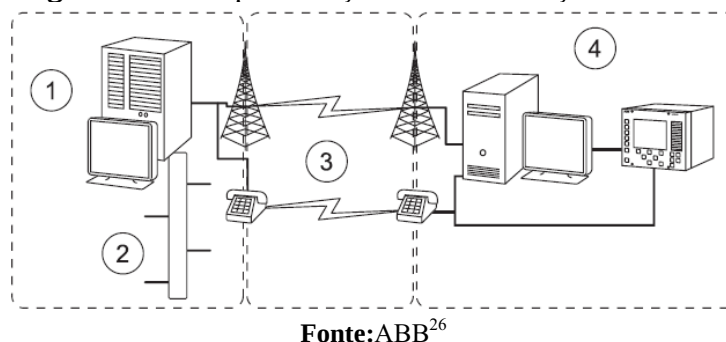
O DNP3 é um protocolo aberto (não proprietário) que pode ser implementado sem restrição, por qualquer dispositivo eletrônico inteligente (*Intelligent Electronic Device* - IED).

Originalmente projetado para companhias de distribuição elétrica, o DNP3 também é utilizado hoje em outras aplicações, tais como, companhias de distribuição e tratamento de águas e esgotos, transporte, indústria petrolífera e companhias de distribuição de gás. O protocolo DNP3 foi desenvolvido através das normas básicas provenientes dos trabalhos do comitê de estudos TC57 da IEC (Comissão Eletrotécnica Internacional), que tratam dos sistemas de potência e dos sistemas de comunicação associados. Foi escolhido pela força de trabalho IEEE C.2 como recomendação IEEE para a comunicação entre RTU (Unidade Terminal Remota) e IED (Dispositivo Eletrônico Inteligente).⁵⁰

O DNP3 é utilizado na automação de dispositivos em subestações ou em circuitos alimentadores, assim como na comunicação entre centros de controle e subestações. É o

protocolo de comunicação mais popular em diversas aplicações nos EUA e na América do Sul, além de ser padrão nacional para aplicação em tratamento de água na Austrália e no Reino Unido. De acordo com o *Newton-Evans Survey* de 2004, 75% as aplicações dos EUA estão utilizando ou planejam utilizar o DNP3 no sistema SCADA. Mostra-se uma representação de comunicação com DNP3 na Figura 27.²⁶

Figura 27 — Representação da comunicação do DNP3



Na Figura 27, tem-se:

- 1- Estação mestre SCADA/ Centro de controle
- 2- Pontos de controle externos
- 3- Enlaces de comunicação
- 4- Subestação remota (estação de computadores e IED)

No início de 2010, o comitê técnico do DNP, começou a trabalhar junto com a IEEE para estabelecer o protocolo DNP3 como um padrão IEEE; este foi implementado como *standard* IEEE 1815-2010 (*standard* IEEE para comunicação em sistemas de distribuição de energia elétrica) no ano seguinte.

Desde então, os membros do comitê técnico DNP, a sociedade de potência e energia, o comitê de transmissão e distribuição (PE/T&D) e o comitê de subestações (PE / Sub) da IEEE, trabalharam em equipe com o objetivo de atualizar algumas seções das especificações do DNP3, onde tem como resultado o padrão IEEE 1815-2012, o qual foi aprovado em 12/10/2012.

A atualização do DNP3 contém algumas mudanças, das quais a autenticação de segurança é incluída. Esta define um mecanismo do protocolo DNP3 que permite determinar a conexão da estação mestre com a estação do usuário sem ambiguidade.

4.1.1 Características Gerais

DNP3 oferece características importantes, bem como de flexibilidade e de segurança. Essas se encontram resumidas a seguir:

- As mensagens são separadas em vários quadros, para proporcionarem uma comunicação de erro de controle ótimo e sequências rápidas.
- Topologia permite ter mestre-escravo.
- Permite topologia multi-mestre.
- Pedidos e respostas com vários tipos de dados em uma única mensagem, e permite que objetos sejam definidos pelo usuário.
- Comunica respostas não solicitadas.
- Protege as configurações de transferência / arquivos.
- Capacidade de mais de 65 000 dispositivos em um único link.
- Fornece sincronização de tempo em tempos em diferentes eventos.
- Confirmações para o nível da camada de enlace de dados e / ou camada de aplicação assegurando a integridade da informação de alta.
- Prioriza um conjunto de dados (classes).

4.1.2 Especificações

DNP3 é adequado para aplicação em todo o ambiente SCADA. Isso inclui RTU para comunicação IED, e mestre para comunicações remotas.

Sendo um protocolo de camada de aplicativo baseado em objeto, DNP3 tem a flexibilidade para suportar múltiplos modos de operação, tais como, pesquisa-resposta, consulta dos relatórios desejados e respostas não solicitadas. Os usuários podem esperar muitos benefícios ao usar o DNP3, no curto prazo:

- Interoperabilidade entre múltiplos fornecedores de dispositivos;
- Menos protocolos de apoio no campo;
- Redução dos custos de software;
- Não tradutores de protocolo necessários;
- Prazos de entrega mais curtos;

- Menos testes, manutenção e treinamento;
- Melhorar a documentação;
- Testes de conformidade independente;
- Suporte por grupo de usuários independentes e fontes de terceiros (por exemplo, conjuntos de teste, o código fonte).

No longo prazo, os benefícios adicionais podem ser derivados da utilização DNP3, incluindo:

- Expansão do sistema fácil;
- Longa vida do produto;
- Mais produtos de valor agregado de fornecedores;
- Adoção mais rápida de novas tecnologias;
- Principais economias operações.

As especificações DNP3 são organizadas em quatro partes principais

- Descrição da camada de dados do protocolo;
- Funções de transporte;
- Descrição da camada de aplicação do protocolo;
- Biblioteca de objetos de dados.

Um complemento de especificações nomeado: “Definição dos ajustes do DNP3”, foi redigido pelo grupo de usuários DNP3 para ajudar os projetistas de equipamentos a identificar os elementos e os opcionais do protocolo para utilização de cada tipo de equipamento relacionado.⁵¹

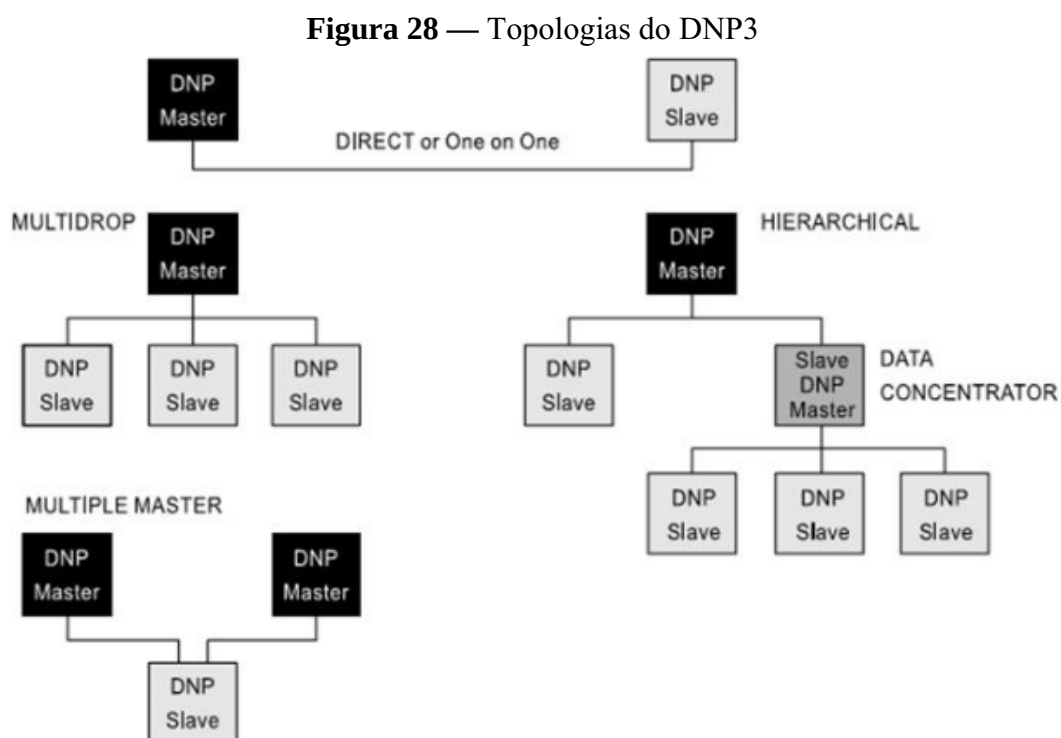
4.1.3 Topologias

As quatro topologias existentes são:

- Mestre / Escravo.

- Vários escravos.
- Hierárquica com concentradores de dados intermediários.
- Múltiplos mestres.

Na Figura 28, tem-se as diferentes topologias do DNP3.



Fonte: Suky.⁶⁴

4.1.4 Fundamentos do Protocolo

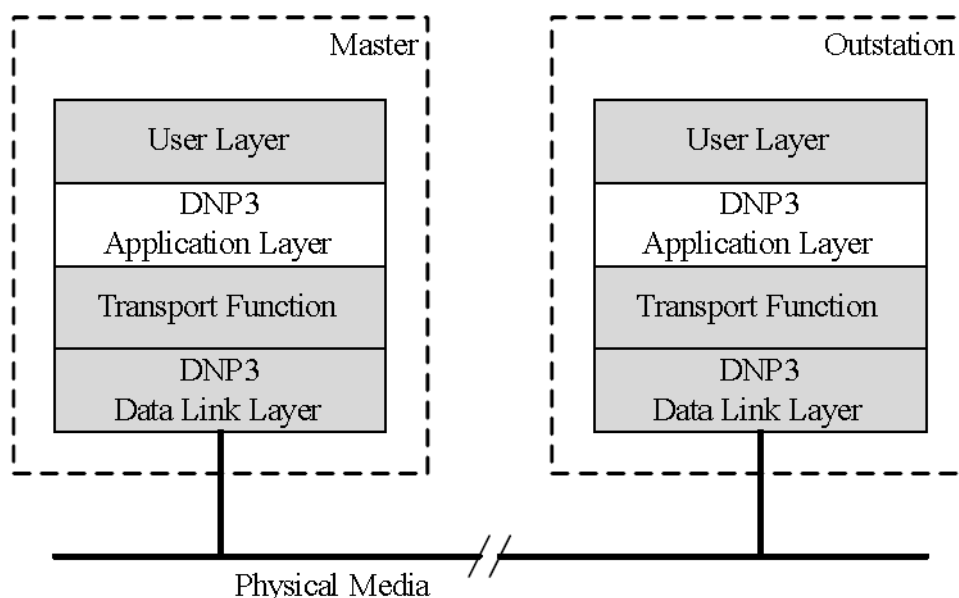
O protocolo DNP3 apresenta dados de forma hierárquica, começando na parte inferior com a camada física até atingir a camada de aplicação no topo (funções de nível superior).

O protocolo DNP3 é implementado em camadas, o protocolo DNP3 adere a um protocolo simplificado de 3 camadas proposto pela IEC para implementações mais simples, chamado de EPA. O DNP3 estende o EPA ao adicionar uma quarta camada de pseudo-transporte que permite segmentação de mensagens.

A pilha do protocolo,³¹ define as camadas de usuário, aplicação, função transporte, enlace de dados, conforme a Figura 29. O protocolo DNP3 define dois dispositivos de sua rede. O dispositivo mestre (*Master*) é responsável geralmente pela solicitação de dados aos

outros dispositivos, e também pela aquisição dos dados para o administrador. O dispositivo remoto ou escravo (*outstation*) é responsável pela coleta, armazenagem e envio de dados quando é solicitado pelo mestre ou quando é detectado um evento crítico que deve ser reportado imediatamente.

Figura 29 — Modelo DNP3



Fonte: Ramalho et al.³¹

A) *Camada de Aplicação*

A camada de aplicação do protocolo DNP3 é responsável por fazer a interface entre a rede DNP3 e a camada de usuário, a camada de usuário é composta basicamente por dois módulos: sistema SCADA conectado ao mestre, o qual é responsável pelas requisições e processamentos dos dados coletados, e sensores conectados aos dispositivos *outstation*, os quais fazem a coleta dos dados. Assim, a camada de aplicação recebe as possíveis requisições SCADA, e assim as traduzem em comandos para o programa de interfase de aplicação (*Application Program Interface* -API). Esses comandos são compreendidos como fragmentos de no máximo 4kbytes de tamanho, e são utilizados para transmitir dados para as camadas inferiores.

Os fragmentos formados na camada de API contêm dois octetos principais como cabeçalho. Entre eles, o Código de Função que define qual a finalidade ou comando API de cada fragmento em requisição de leitura, resposta, entre outros comandos.

Os comandos foram divididos por dispositivo *master* e *outstation*, a fim de relacionar os tipos de fragmentos que cada um está apto a enviar. Sendo assim, os comandos para envio

vinculados ao dispositivo *outstation* têm o objetivo de responder aos comandos enviados pelo *master*. Entretanto, na ocorrência de eventos críticos, o *outstation* gera uma mensagem espontânea que não depende do recebimento de requisições.

A implementação dos comandos dependerá das características da rede DNP3 que se pretende criar. Além da capacidade individual, o dispositivo mestre não deverá efetuar o envio de comandos a um medidor inteligente (*smart meter outstation*) que não esteja apto a respondê-lo com seus recursos.

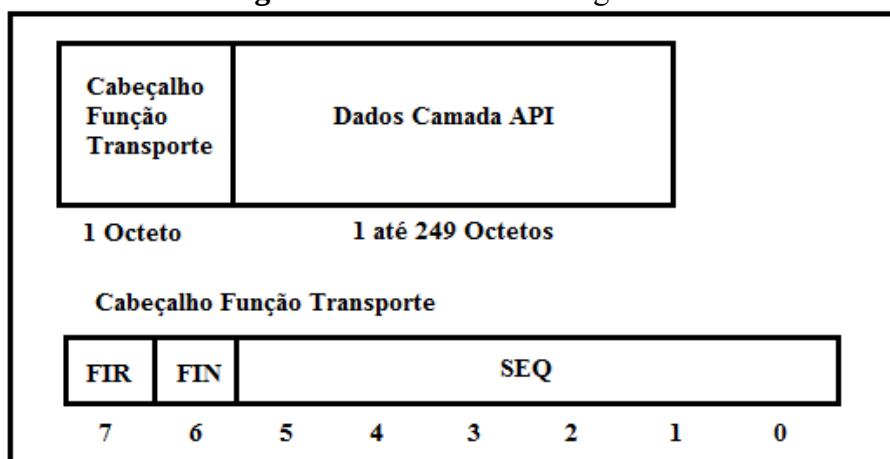
B) Camada de Função de Transporte

É a camada que segmenta as mensagens da camada de aplicação em diversos segmentos. Para cada segmento, essa camada insere um código de função de byte único que indica se o segmento é o primeiro segmento da mensagem, o último segmento da mensagem ou ambos (para mensagens de um único frame). Este código de função ainda inclui um número de sequência de segmento que incrementa a cada segmento e permite a camada de transporte detectar segmentos descartados.

Os segmentos possuem tamanho fixo de 250 octetos, contando a adição de apenas um octeto que servirá de cabeçalho da função a cada segmento. Observa-se isto na Figura 30, onde FIR indica que este é o primeiro segmento, FIN indica que este é o ultimo segmento e SEQ indica qual número de sequência é este segmento.

Estes segmentos são repassados para a função de transporte (TF) que, além disso, essa função também remonta os segmentos em fragmentos durante a recepção de dados.^{32,33}

Figura 30 — Formato de Segmento



Fonte: Ramalho et al.³¹

C) Camada de Enlace de Dados

A camada de enlace DNP3 administra a comunicação em modo “equilibrado”, o que significa que tanto o dispositivo mestre quanto o dispositivo escravo podem inicializar a transmissão de mensagens.

No esquema clássico de um sistema de supervisão, o dispositivo mestre se encarrega de interrogar ciclicamente os dispositivos escravos. Neste caso, a transmissão é sempre inicializada pelo dispositivo mestre, que emite uma mensagem de pedido ao dispositivo escravo. O escravo executa a ordem solicitada e retorna uma mensagem de resposta. O dispositivo escravo pode, segundo suas capacidades e sua configuração, emitir espontaneamente mensagens. Assim, sem ser solicitado pelo mestre, o escravo pode enviar mensagens para informar o mestre de uma mudança de estado de uma informação binária, de uma passagem de nível de uma medição ou de um contador. Estas informações, emitidas espontaneamente pelo dispositivo escravo são denominadas respostas não solicitadas.

A emissão de respostas não solicitadas pode ser inibida pela configuração do escravo e por um comando especial enviado pelo mestre. Para resolver os conflitos de acesso no meio de comunicação entre o mestre e os escravos, que podem ocorrer nas emissões espontâneas, o protocolo DNP3 integra um mecanismo de administração das colisões. Na Figura 31, tem-se a transmissão dos dados do mestre para o escravo e vice-versa e do escravo para o mestre sem ser solicitado.

Figura 31 — Transmissão de dados mestre/escravo.

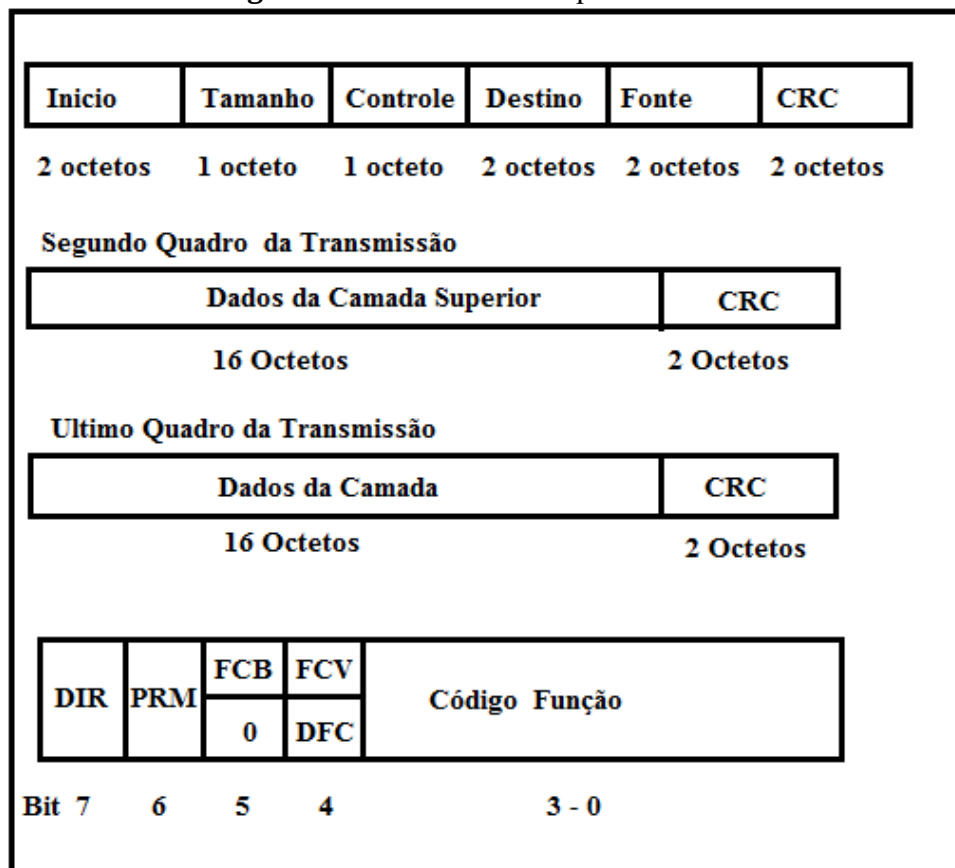


Fonte: Schneider Electric Brasil⁵¹

A camada de enlace divide cada segmento em quadros ou datagramas para serem entregues na transmissão de meio físico. Nessa transmissão, o quadro inicial apenas é um cabeçalho com 10 octetos, sendo que destes os dois últimos octetos fazem parte da verificação de erro (*Cyclic Redundancy Check* - CRC) de 16 bits. A partir, do cabeçalho inicial, o

conteúdo do segmento é dividido em *payloads* de 16 octetos cada um, com adição de dois octetos de CRC 16 bits ao final. Apresenta-se na Figura 32, o formato do quadro final, e a sequência dos quadros que é enviada, de forma que é necessário o retorno de um quadro ACK do receptor, indicando que o segmento total foi recebido de forma correta, após isso a camada de enlace de dados autoriza o envio do próximo segmento, devidamente dividido em quadros ou datagramas.^{32,33}

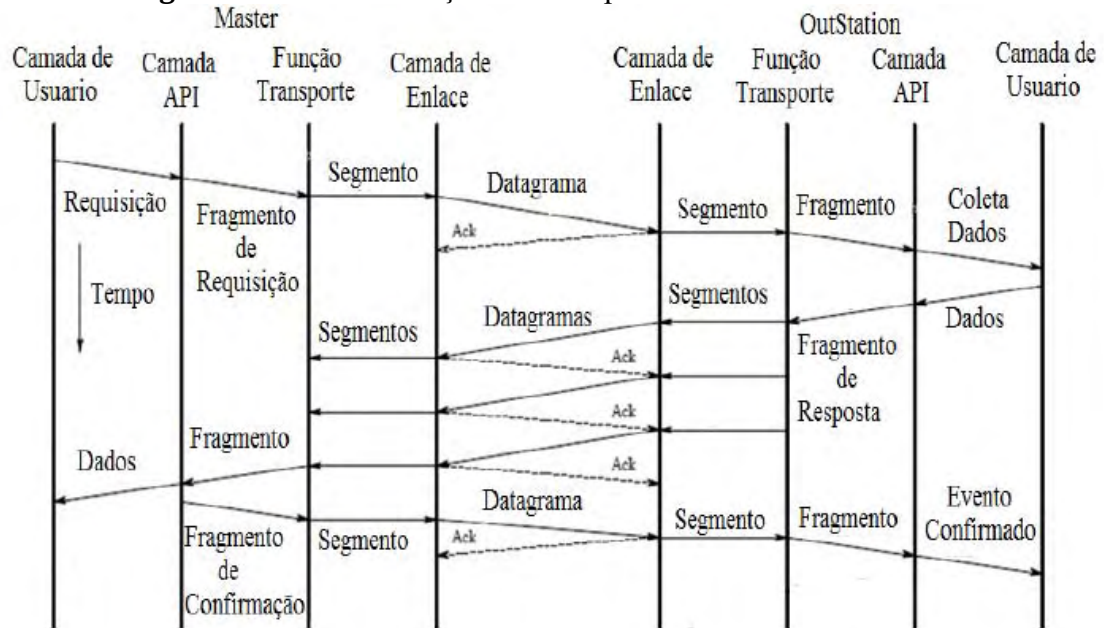
Figura 32 — Formato dos quadros finais.



Fonte: Ramalho et al.³¹

D) Transmissão de Dados Entre Dispositivos Master e Outstation

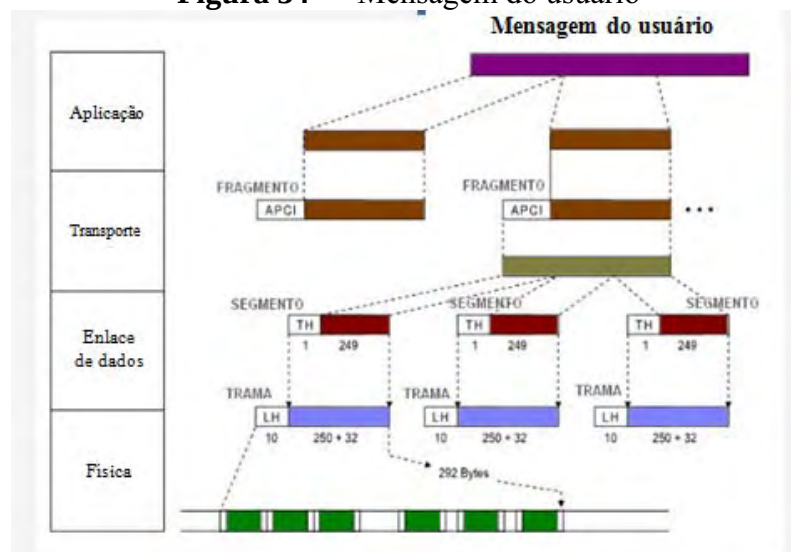
Um exemplo, da transmissão de dados entre os dispositivos mestres e *outstation*, para solicitação de dados ou envio de dados não solicitados espontâneos, é mostrado na Figura 33.

Figura 33 — Comunicação entre dispositivos mestres e *outstation*.

Fonte: Ramalho et al.³¹

Considerando que o protocolo tem uma alta confiabilidade, gerada nas confirmações de entrega provenientes da camada de enlace, o meio físico torna-se alvo de disputa no acesso para a transmissão de dados, considerando que neste trabalho o estudo deste protocolo será em um ambiente sem fio.

A Figura 34 mostra a estrutura da mensagem entre dispositivos de DNP3. Cada camada do modelo leva a informação retirada da camada superior, e acrescenta informações sobre os serviços prestados por ela.

Figura 34 — Mensagem do usuário

Fonte: Suky.⁶⁴

4.2 SCADA

São sistemas que utilizam software para monitorar e supervisionar as variáveis e os dispositivos de sistemas de controle conectados através de drivers específicos. Estes sistemas, podem assumir topologia *mono.post*, cliente-servidor ou múltiplos servidores-clientes, que atualmente tendem a tornar-se livre dentro dos protocolos de comunicação.

De fato, o sistema SCADA básico interconecta dois ambientes distintos: a subestação e o centro de operações. Interfaces para equipamentos da subestação e fontes de conversões e comunicações completam o sistema. O ponto terminal para um sistema SCADA tradicional é uma RTU (Remote Terminal Unity - Unidade Terminal Remota), onde ocorre a interface entre a comunicação e os equipamentos da subestação.

As RTUs coletam medidas do sistema elétrico, transmitem essas medidas para um centro de operações, onde o SCADA central apresenta-as aos operadores através de uma IHM (Interface Homem-Máquina). A IHM permite ao operador monitorar e controlar todos os parâmetros do sistema elétrico em tempo real. Isso é feito utilizando programas implementados em plataformas gráficas, tipo Windows ou Linux.

A principal função do sistema SCADA ou sistema de automação é medir as atividades dos sistemas de energia, processando as medidas e relatando os dados aos centros de operação. Os dados são medidos através do uso de transformadores de potência e transformadores de corrente (TPs e TCs).

Os valores de tensão e corrente medidos pelos TPs e TCs, respectivamente, são inseridos em dispositivos conhecidos como IEDs. Estes possuem recursos valiosos capazes de disponibilizar informações importantes sobre o sistema, seja ele operacional ou não operacional, necessárias a muitos grupos de usuários dentro da concessionária de energia em um ambiente integrado. O desafio das concessionárias é então determinar um padrão de integração que possa vir de encontro com suas necessidades específicas.

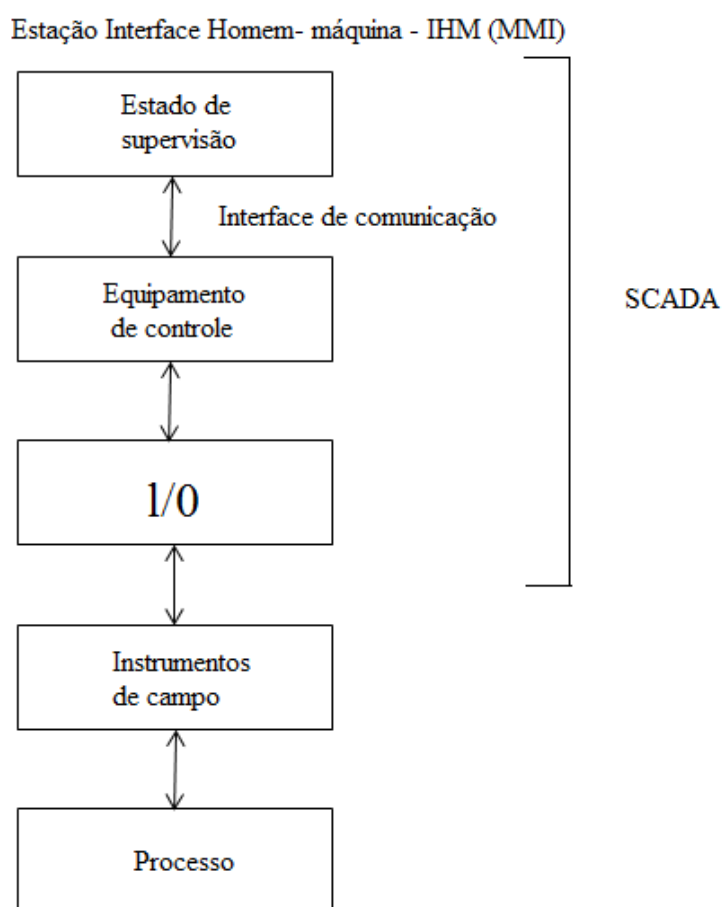
IEDs são definidos como qualquer dispositivo incorporando a um ou mais processadores com capacidade de receber ou transmitir dados/controles de/ou para uma fonte externa (medidores multifuncionais eletrônicos, relés digitais, CLPs - Controladores Lógico Programáveis, etc.).⁵²

O sistema SCADA normalmente consiste de dois subsistemas: sendo um a estação de supervisão, que é a unidade que promove a interface humano máquina ou IHM, e o aparato que apresenta dados de processo para o operador humano, e por meio deste, o operador

monitora e controla o processo. Essa IHM é provida por um conjunto de software de supervisão de um microcomputador compatível com o sistema a ser executado.

O outro subsistema é um sistema de controle e/ou aquisição de dados, que geralmente o sistema de controle de tempo real é constituído de unidade separada da estação de supervisão. Pode ser um conjunto de controlador lógico programável (CLP), controlador multiloop, controlador single loop, unidade terminal remota (RTU), entre outros. Essas unidades são conectadas aos sensores e atuadores do processo, e convertem os sinais dos sensores para dados digitais e os dados de controle para os atuadores. Em alguns casos a estação de supervisão desempenha a tarefa de executar os algoritmos de controle (DDC); infraestrutura de comunicação que conecta a estação de supervisão as unidades de controle e a Unidades Terminais Remotas (RTUs) de I/O. Na Figura 35 apresenta-se um diagrama que ilustra as partes de um sistema SCADA.

Figura 35 — Diagrama das partes de um sistema SCADA

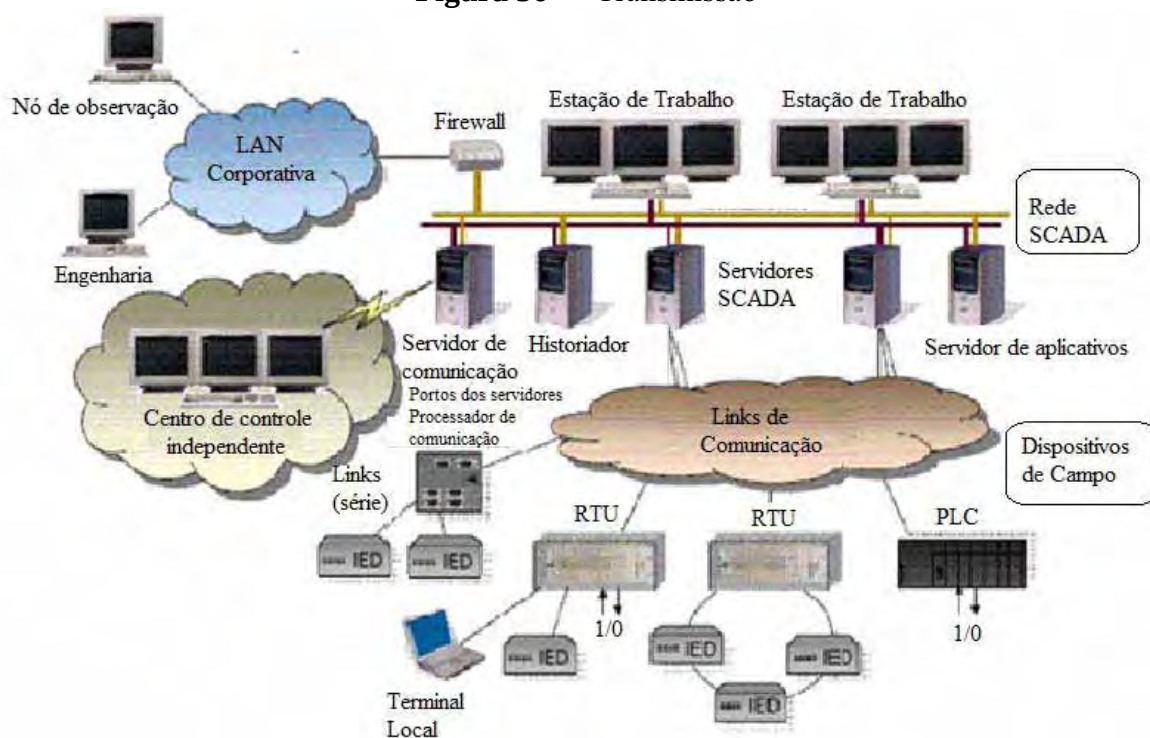


Fonte: Massad e Santos⁵³

4.2.1 Flexibilidade da Arquitetura

Um sistema SCADA pode compreender mais de uma estação de supervisão, podem existir estações específicas para relatórios, gráficos de tendência, controle estatístico do processo, entre outros. A infraestrutura de comunicação pode utilizar diversas tecnologias de transmissão de dados e até mesmo utilizar redes redundantes para aumentar a disponibilidade do sistema. Além disso, todo o sistema pode ser monitorado a distância por meio da rede WAN. A Figura 36 exemplifica a flexibilidade da arquitetura de um sistema SCADA.⁵³

Figura 36 — Transmissão



Fonte: Massad e Santos⁵³

Sistemas SCADA tipicamente implementam um banco de dados distribuídos, geralmente chamado de banco de dados de *tagname* que contém dados dos pontos de I/O. Um ponto representa um único valor de entrada ou saída monitorada ou controlada pelo sistema. Um *tagname* pode estar endereçado a uma entrada ou saída física do equipamento de controle, assim como pode permitir a leitura e escrita de outros endereços da memória do equipamento de controle.

4.3 MODEM GPRS

A GPRS é uma tecnologia baseada na comutação de pacotes, resultado da evolução da tecnologia de comunicações moveis GSM desenhada com o objetivo de otimizar os serviços de transmissão de dados sobre uma rede atualmente utilizada para a transmissão de voz, onde as tradicionais redes GSM não estão adaptadas as necessidades de transmissão de dados com terminais moveis. Por isso, surge GPRS, uma rede que unifica o mundo IP com o mundo da telefonia móbil, o qual cria uma rede paralela à rede GSM e esta é orientada exclusivamente à transmissão de dados. No quadro 3 apresenta-se a pilha integrada de IEEE 1815 / TCP / GPRS donde se descrevem as camadas e tamanho dos quadros.

Quadro 3— Pilha integrada IEEE 1815 / TCP / GPRS

PILHA	DESCRIÇÃO DE CAMADAS	TAMANHO DE CUADROS
DNP 3	Camada de aplicação	292 bytes
TCP/IP	Camada de TCP	20 bytes (cabeçalho) + 292 bytes (payload) = 312 bytes
	Camada de IP	20 bytes(cabeçalho) + 312 bytes (payload) = 332 bytes
	Camada de SNDCP	4 bytes (cabeçalho) + 332 bytes (payload) = 336 bytes
	Camada de LLC	8 bytes (cabeçalho) + 336 bytes (payload) = 344 bytes
GPRS	Camada de RLC	(344 bytes / COD)*3(cabeçalho) + 344 bytes (payload)
	Camada de MAC	1 byte (cabeçalho) + payload
	Camada de GSM RF	

Legenda: A variável COD depende do esquema de codificação utilizado na transmissão dos dados, que serão descritos na seção 4.X.

Fonte:IEEE 1815/2010⁵⁸, IEEE 802.2/1985⁶¹,RFC 791/1981⁵⁹, RFC 793/1981⁶⁰, Heine e Sagkob⁶²

Abaixo, estão brevemente descritas as funcionalidades dos protocolos pertencentes à pilha TCP/IP, conforme ilustrado no Quadro 4:

- **TCP:** É o protocolo da camada de transporte orientado a conexão, que oferece um serviço confiável. Uma das principais características é: entregam ordenadamente os datagramas provenientes do protocolo IP, verifica a ordem de os dados para evitar uma *overhead* de rede, formata os dados em segmentos de comprimento variável para entrega-los ao protocolo IP.

Graças ao protocolo TCP, as aplicações podem comunicar de forma segura independente de as camadas inferiores, o que significa que os roteadores têm como único papel o encaminhamento dos dados em forma de datagramas, sem se preocupar com o controle de dados, já que o TCP corresponde a camada de transporte.

- **IP:** É um dos protocolos mais importantes da internet, ele faz parte da camada de internet da sequência dos protocolos TCP/IP. Permite a elaboração e o transporte dos datagramas IP que são os pacotes de dados sem, contudo, assegurar a entrega. É especificamente limitado em escopo para fornecer as funções necessárias para a entrega de bits em datagramas a partir de uma fonte para um destino através de um sistema de redes interconectadas.
- **SDNCP:** Ele efetua a multiplicação dos pacotes em uma ou várias camadas, comprimir protocolos de informação e controle como os dados utilizados, segmentação e montagem.
- **LLC:** É responsável em implementar a interface do nível de enlace com o nível de rede, fornecer serviços como multiplexação e o controle do fluxo e dos erros. Ele pode trabalhar no modo de transferência com ou sem reconhecimento. No modo com reconhecimento, a camada LLC pode solicitar a retransmissão dos quadros corrompidos/perdidos e não confirmados. No modo sem reconhecimento, nenhuma recuperação de erro é desempenhada nessa camada.

O uso mais comum do LLC ocorre do seguinte modo: quando a camada de rede de uma máquina transmite um pacote para a subcamada LLC (através de primitivas de acesso), esta fica responsável por adicionar um cabeçalho LLC contendo números de sequência e de confirmação.

- **RLC:** É responsável por algumas funções como; Transferência de LLC-Payload entre a camada LLC e a função MAC, Segmentação de LLC-Payload em blocos de dados RLC e a remontagem dos blocos de dados RLC para a inserção destes em blocos de quadros MAC. Segmentação e remontagem das mensagens de controle RLC/MAC em blocos de controle RLC/MAC e Correção de erro no

sentido reverso para a transmissão seletiva dos blocos de dados RLC. O bloco de dados do RLC, juntamente com um cabeçalho MAC, pode ser codificado com o uso de um a quatro esquemas de codificação definidos que são utilizados de acordo com as condições de canal (ruído). O esquema de codificação é descrito para a decisão do processo de segmentação.

O esquema de codificação aplicado sobre os dados é utilizado para garantir a robustez dos pacotes transmitidos contra erros. No Quadro 4, apresenta-se a quantidade de dados com o cabeçalho RLC, que é o número de octetos contendo dados úteis que pode ser transmitidos em cada bloco, dependendo do codificação utilizado.⁵⁷

Quadro 4— Cenários de codificação

CENARIO DE CODIFICAÇÃO	DADOS E CABEÇALHOS
CS-1	22 octetos
CS-2	32 octetos
CS-3	38 octetos
CS-4	52 octetos

Fonte: Oliveira et al.⁵⁷

MAC: controla o acesso ao meio compartilhado. O MAC realiza estas funções colocando informações de controle em seu cabeçalho. Estas informações descrevem qual tamanho e tipo de quadro se está transmitindo.

Com a tecnologia GPRS, são mantidas as vantagens que oferecidas pela GSM e, além disso, são obtidas as seguintes melhorias:

- **Cobertura:** com GPRS se tem uma rede de dados móvel com cobertura de 100% sobre a rede de voz em todas as regiões onde existe a cobertura.
- **Velocidade:** com GPRS a velocidade de transmissão de dados aumenta de 40 kbps até 115 kbps por comunicação e, além disso, a tecnologia utilizada permite compartilhar cada canal por vários usuários, o qual melhora a eficiência da utilização dos recursos da rede.

- **Tarifas:** o cliente paga pela quantidade de informação transmitida e recebida e não pela duração das chamadas.

Uma SG distribui eletricidade dos fornecedores aos consumidores usando tecnologia digital para economizar energia, reduzindo custos e melhorando a confiabilidade e a transparência. Uma rede de energia tão modernizada está sendo promovida por muitos governos como uma forma de lidar com a independência energética, aquecimento global e questões emergentes.

Uma solução é telemetria ou telemetria celular, que engloba os dispositivos adquiridores de campo com comunicação GPRS, ao software concentrador de dispositivos e as diferentes ferramentas de aquisição e visualização, ou registro final da informação. São seus componentes principais:

- **Hardware:** permite a aquisição das variáveis físicas de campo.
- **Software:** controla os dispositivos de campo e guarda a informação.
- **Usuário final:** permite ao usuário final o acesso à informação, mediante diferentes interfaces ou formas de visualização.

4.3.1 Interfases de Comunicação

A comunicação SG pode ser realizada por diversos tipos de interfaces. No Quadro 5 são descritas algumas características relacionadas à algumas tecnologias de interface sem fio que podem ser utilizadas em SG.

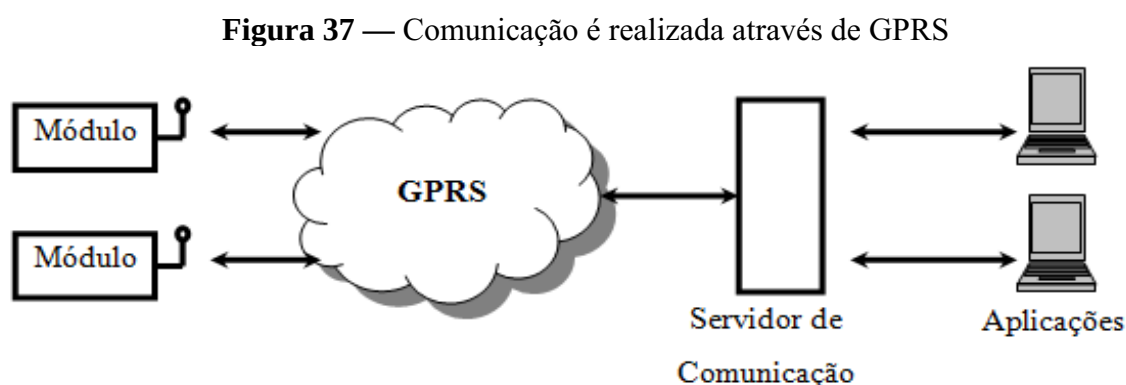
Quadro 5— Interfases de comunicação previstas para *Smart Grid*

	Interfaces de Comunicação						
Características	802.11	Bluetooth	802.15.4	Zigbee	2,5 G	3G	4G
Alcance (m)*	centenas	dezenas	mil	mil	milhares	milhares	milhares
Taxa de Transmissão	11, 54 ou 600 Mbps	1, 2 ou 3 Mbps	250 Kbps	250 Kbps	170 Kbps	2 Mbps	100 Mbps
Segurança*	80.11i e 802.11w	Shared Secret	AES 128 bits	AES 128 bits	AES 128 bits	AES 256 bits	AES 256 bits
Número de nós	dezenas	dezenas	milhares	milhares	milhares	milhares	milhares
Topologias	P2P, P2M	P2P, Estrela	P2P, P2M	P2P, P2M, Malha	Celular	Celular	Celular
Tamanho de Datagrama	Até 64 kbytes	Até 64 kbytes	Até 133 bytes	Até 133 bytes	Até 64 kbytes	Até 64 kbytes	Até 64 kbytes
Aplicação SG	HAN, Subestações	HAN, Veículos Elétricos	HAN	HAN	NAN, WAN	NAN, WAN	NAN, WAN

Fonte: Ramalho et al.³¹

4.3.2 Arquitetura da Solução de Telemetria

A solução para telemetria possui um equipamento remoto processado, provido de modem celular para comunicação via GSM/GPRS com seus respectivos aplicativos de monitoração e controle. A solução contempla um ambiente externo à empresa em que a comunicação é realizada via GPRS, como mostra a Figura 37.



Fonte: Souza Jr.⁵⁶

Nesta arquitetura, existem os “Módulos” em campo, espalhados em uma grande região, tendo sua comunicação garantida pela rede de celulares. O servidor de comunicação tem a responsabilidade de receber os dados desta rede celular e repassá-los à rede TCP/IP interna da empresa, onde residem as aplicações.

A arquitetura da solução do sistema de telemetria flexível está composta de:

- Servidor de comunicação independente;
- Equipamentos de telemetria em campo;
- Aplicativos de negócio independentes.

A solução deve possuir características básicas para:

- Arquitetura escalável com capacidade de suportar um grande número de equipamentos conectados simultaneamente.
- Atendimento de conexões de outros meios de comunicação, além do GPRS, em virtude do avanço da tecnologia de comunicação.

- Capacidade de conexão com qualquer dispositivo que possua conexões padrão via RS232 (serial) e RS485 (*modbus*/RTU).
- Independência de protocolo do dispositivo conectado.

4.3.3 Servidor de Comunicação

O servidor de comunicação deve possuir apenas uma porta aberta em seu sistema para receber os dados vindos da rede GPRS. Ainda que, este servidor esteja atendendo a conexões provenientes de um canal com a internet, há mecanismos de autenticação que evitam que duas ou outras estratégias de um programador gênio possam dominar e alterar programas e equipamentos de computação e teleprocessamento, sendo capaz de invadir à distância outros computadores, utilizando ilegalmente os recursos do modem (*Hacking*) o que afeta o funcionamento do servidor. A distribuição destes dados é realizada na rede interna da empresa no centro de operação, onde o nível de segurança é maior, mas mesmo assim, pode-se utilizar qualquer *software* de *firewall* para garantir o acesso restrito às portas internas utilizadas e aumentar a segurança do sistema.

Para que o módulo estabeleça a comunicação com o servidor, é necessário o envio de uma autenticação, o que reforça a autenticidade do módulo e evita que agentes agressivos externos comprometam a segurança. Em nenhum momento, dados provenientes de qualquer módulo, são reenviados para conexões externas, garantindo sua inviolabilidade.

4.3.4 Características Gerais

A comunicação com servidor de comunicações via TCP/IP, independente do aplicativo de negócios, possui capacidade de:

- Controlar todos os equipamentos conectados e respectivos status de conexão;
- Possibilidade de utilização de sistemas operacionais Unix, Linux e Windows;
- Permitir a contabilização dos dados trafegados;
- Permitir a visualização online dos dados trafegados;
- Possibilidade de armazenamento (opcional) do tráfego por módulo conectado;

A possibilidade de configuração do servidor de comunicação através dos seguintes modos:

- Direto: através da atribuição de 01 porta TCP/IP para cada módulo conectado;
- Pool de conexão: utilização de 01 única porta TCP/IP para a aplicação FIM independente do número de módulos conectados;
- Proxy: conexão direta com a aplicação FIM.

Pool de conexão é um armazenador que mantém uma lista de conexões abertas e reutilizáveis. Uma aplicação poderá conter um ou vários pools ao mesmo tempo e a qualquer momento, mas estes não são compartilhados entre aplicações. Um servidor Proxy é um serviço que acelera a navegação de paginas da internet, sua função é armazenar as páginas mais acessadas pelos usuários, para assim disponibilizá-las de forma mais rápida. Além de garantir a segurança do sistema impedindo o acesso a sites impróprios.^{54,55}

4.3.5 Especificações técnicas

4.3.5.1 Descrição hierárquica do modem

A descrição hierárquica do modem, conta com a utilização de componentes profissionais voltados para aplicações de nível industrial; sendo esses da comunicação sobre rede GSM:

- Pacotes bidirecionais (*Short Messages Service - SMS*);
- Conexão dados comutados de circuito (*Circuit Switched Data - CSD*);
- GPRS.

A execução remota do software instalado no equipamento requer:

1. Conexão com qualquer dispositivo ou equipamento via RS232 e RS485, a possibilidade conexão com 02 dispositivos via RS232 simultaneamente, capacidade de gerenciamento da conexão GPRS, independente do dispositivo conectado.
2. Configuração remota do equipamento, capacidade de geração de alarmes através de sinais lógicos Transistor-Transistor (*Transistor-Transistor Logic - TTL*) ou contato seco e acionamento remoto de dispositivos conectados nas portas de I/O, a

possibilidade de envio dos alarmes via de serviço de mensagens curtas (SMS), diretamente para celulares cadastrados.

3. Capacidade de contagem de pulsos a partir das portas de I/O, possibilidade de utilização, a partir de um mesmo hardware, de softwares instalados com finalidades diferentes de acordo com regras de negócio definidas, também a possibilidade de transmissão de dados via GSM/GPRS, entre qualquer dispositivo eletrônico com seu respectivo aplicativo gerenciador de forma transparente, independente de seu protocolo.
4. Capacidade de operar em modo MODEM e, para qualquer equipamento apto a operar desta forma demonstrando: capacidade de permitir a leitura destes equipamentos com taxa de sucesso superior a 95%; capacidade de originar e receber chamadas discadas para definição de endereçamento do protocolo de internet (*Internet Protocol* - IP) fixo para o equipamento de telemetria independente da operadora de telecomunicações.

4.3.5.2 Características de hardware

Contém bateria de *backup* interna opcional, para sinalização de condições de falta de energia elétrica. Sendo os dados ambientais:

- Alimentação: 90 ~ 240 Vac ou 10-30 Vdc ;
- Corrente em regime (para 24 V): 80 mA;
- Corrente de repouso (para 24 V): 40 mA;
- Temperatura de operação: -20° C a +70° C.

Outras características do hardware são:

Portas de Comunicação:

- RS232C com velocidade programável de 300 a 115200 bps;
- RS232C para configuração local a 4800 bps;
- RS485 para dispositivos RTU;

Portas de Entrada e Saída:

- 01 Saída digital a relê 15 A;

- 05 Entradas digitais com acoplamento óptico para sinais de 5V a 250V (ac/dc);
- 03 Portas digitais do tipo entrada/saída configurável para nível TTL ou Driver OC para 600ma;

Conectores:

- RS232 DCE conector DB9M;
- RS232 DTE conector DB9F;
- Antena R/F TNC;
- Entradas e saídas em bloco de terminais removíveis 15 A – 300 Vac – fio até 2,5mm².

Acessórios externos:

- Antenas de ganho de +0dBm a 24dBm;
- Saída para áudio analógico MIC/SPK.

Rede Celular:

- GSM 800/850/1800/1900 MHz;
- GSM SMS/GPRS/CSD;

Há também a possibilidade de acesso ao equipamento remoto via GPRS, a partir de software aplicativo através de:

- Endereçamento IP;
- Porta Serial;
- Emulação de Modem Discado;
- Número Serial do Modem;
- Número do Celular originado pela Operadora de Telecomunicações.

De acordo a essas características, existe a capacidade de reconexão automática na rede GPRS, nos casos de desconexão pela operadora de telecomunicações, e a capacidade de coleta de dados atuação através de I/O's, conjuntamente com o tráfego de mensagens utilizados pelo equipamento monitorado.⁵⁶

5 ESTUDO DE CASO

5.1 Introdução

Neste capítulo é apresentada a metodologia proposta para o estudo de um sistema de comunicação entre um centro de operações e um dispositivo compensador série instalado em uma rede de distribuição de média tensão. O sistema de comunicação é implantado a partir da filosofia de comunicação em SG. Este sistema de comunicação é proposto com o objetivo de conhecer o comportamento das variáveis elétricas associadas a operação e funcionamento de um controlador FACTS em tempo real e, além disso, ter a possibilidade de exercer o monitoramento sobre o dispositivo em questão, através do sistema de comunicação aqui proposto e garantir assim um melhor funcionamento do mesmo.

Para a infraestrutura atual dos sistemas elétricos de potência, é necessário um levantamento do material técnico e científico referente à utilização da filosofia de SG. Neste caso foi escolhido um problema específico de uma concessionária a comunicação do compensador série (D-TCSC), em uma subestação, com o centro de controle.

5.2 Localização do D-TCSC

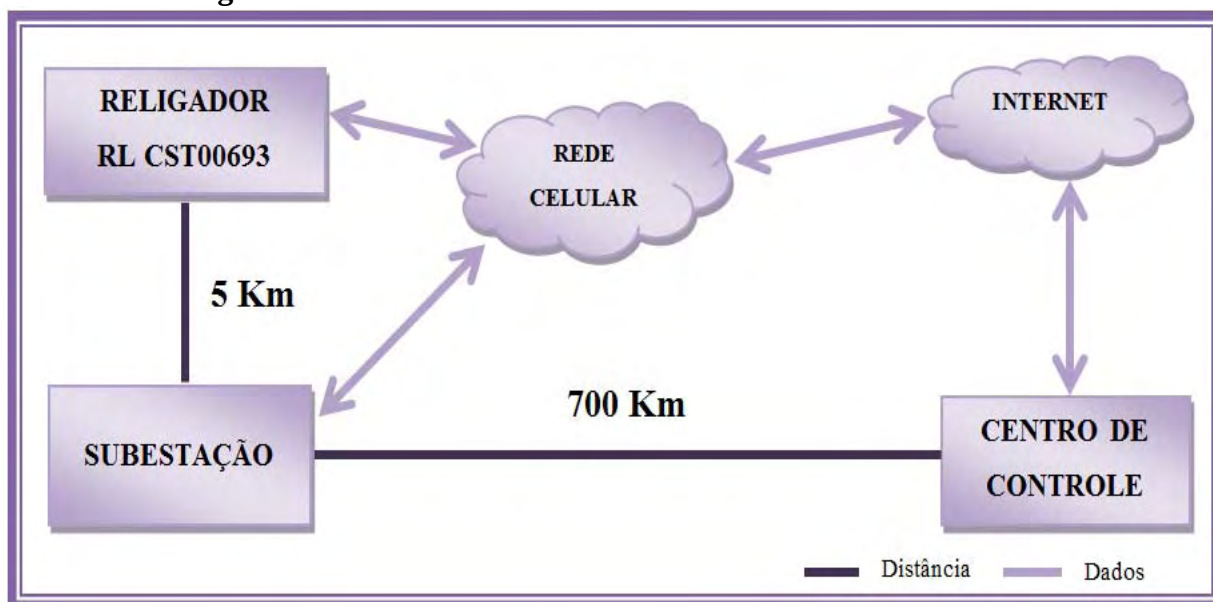
A comunicação proposta entre a rede de distribuição do D-TCSC ao centro de controle, mediante a filosofia de SG para verificação de desempenho da compensação série controlada, pertence a uma concessionária de energia e foi denominado caso CST08.

A escolha do ramal Castilho CST08 baseou-se no histórico de reclamação dos clientes em função da grande variação de demanda de tensão em um curto período de tempo, mais especificamente no uso da energia elétrica para irrigação de pasto. Por isso, justifica-se a importância de comunicar os dados de tensão e corrente ao centro de operações em tempo real para garantir um melhor funcionamento do compensador série.

O ramal Castilho CST08 se encontra distante do centro de controle da concessionária de distribuição de energia elétrica, para onde serão enviados os dados já mencionados anteriormente. A distância entre a rede, situada na zona rural, e a central de controle, na cidade de Campinas, é de 700 km. Devido a essa localização remota, torna-se inviável economicamente a implantação de enlace de dados cabeados por fibra ótica, por exemplo. Por isso, esta proposta sugeriu a utilização da tecnologia de rede celular como solução de baixo

custo. Tal área remota possui cobertura da rede GPRS da concessionária de telefonia, pois já existe um enlace entre um religador (RL CST00693) instalado a 5 km de distância da subestação e a central de controle, conforme Figura 38.

Figura 38 —Distâncias em km e transmissão de dados do estudo.



Fonte: Elaboração do autor.

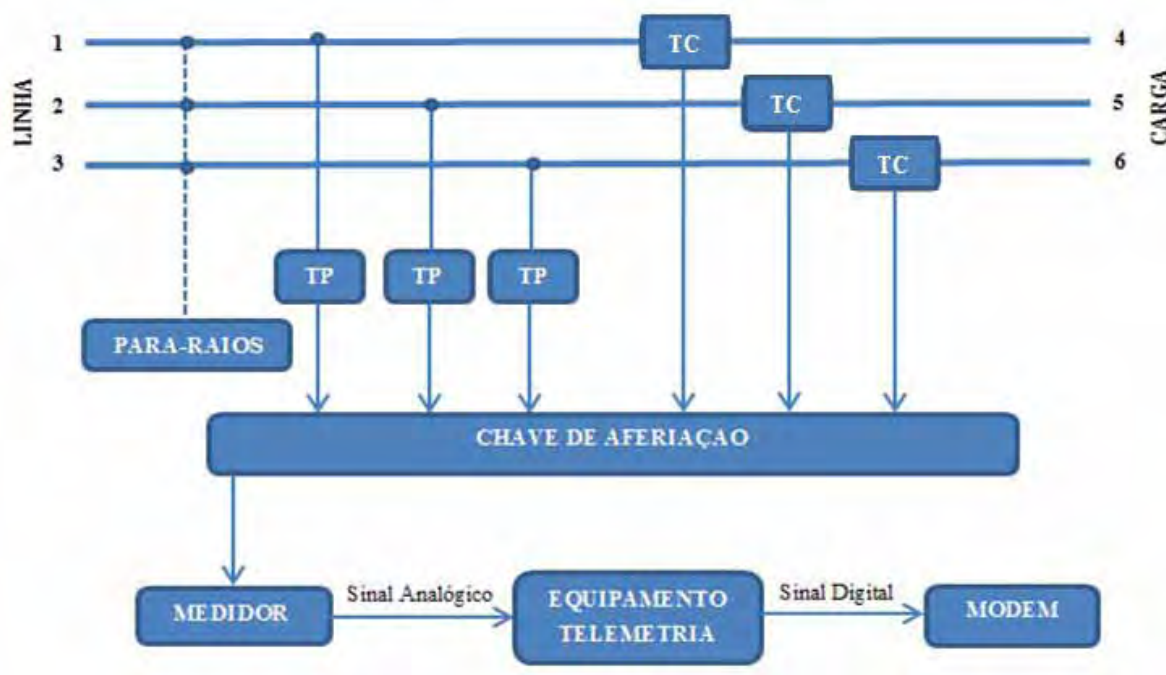
A solução adaptada para a comunicação será feita mediante a aquisição de dados de tensão e corrente, por meio de um equipamento que tem como objetivo uma solução completa para a medição em média tensão.

Após, obter os dados através do equipamento, descrito na seção 5.3, os mesmos serão enviados a um modem GPRS que, através de um endereço IP, efetuará o encapsulamento dos dados coletados para que possam trafegar nas redes TCP/IP na internet, descrito na seção 5.4. Assim, o encaminhamento dos dados são transmitidos da subestação, passando por a rede celular, internet até sua chegada a centro de controle.

5.3 Monitoramento de Variáveis Elétricas

O equipamento utilizado para fazer medição em média tensão, se reúne em um único produto, transformador de medição encapsulado (TC e TP), para-raios para uma proteção contra descargas atmosféricas e uma chave de aferição do equipamento de telemetria. O princípio de funcionamento é brevemente descrito por meio do diagrama apresentado na Figura 39.

Figura 39 — Diagrama de funcionamento do transformador de medição encapsulado.



Fonte: Elaboração do autor.

De acordo com a Figura 40, tem-se:

TC: Transformador de corrente, um por fase.

TP: Transformador de potencial, um por fase.

Chave de aferição: Permite a inspeção, manutenção ou calibração do medidor de energia, desconectando a alimentação do circuito de tensão e fechando o circuito de corrente. Dessa forma, o medidor é isolado dos TCs e TPs sem necessidade de interromper o fornecimento de energia elétrica.

Medidor: contém 3 elementos, 4 fios conexão indireta.

Para-raios: Dispositivos de proteção contra descarga atmosférica, por padrão ao lado da linha (fonte).

Equipamento de Telemetria: Conversão de dados analógicos coletados em digitais.

Modem: Monta os dados em um datagrama DNP3/GPRS.

Alguns requisitos principais do equipamento de monitoramento encapsulado são:

- Tornar possível sua utilização em tensão de 13,8 kV;
- Diminuir o tempo para a instalação e implantação do sistema e englobar uma solução completa para a medição e monitoramento de energia, com menor número de conexões possíveis;
- Fornecer maior segurança operacional em função de menor número de conexões na instalação e da existência da chave de aferição;

- Tornar fácil e ágil a manutenção com a substituição apenas de componentes defeituosos (TC, TP, medidor ou equipamento de telemetria);
- Poder ser usado com unidades remotas;
- Possuir proteção hermética contra entrada de água;
- Conter transformador de corrente sem derivação, que apenas um valor de corrente de entrada é possível, sem a possibilidade de mudança;
- Conter transformador de corrente com derivação, onde há a possibilidade de escolher entre dois valores de corrente de entrada através da comunicação de *tapes* do secundário. Assim, nos casos de concessionárias que utilizem dois valores de relação de entrada de corrente para medição em sua rede, podem utilizar as relações mais adequadas às necessidades;
- Conter um conjunto de medição de transformador que incluir equipamento de telemetria para conversão dos dados analógicos para digitais;
- Indicar a tensão primária e secundária dos transformadores de potência (TPs) e o valor nominal da tensão primária é $13.8/\sqrt{3}$ kV (tensão fase-neutro) e da tensão do secundário é 115 V;
- Conter Interface serial para transmissão dos dados para o modem de comunicação.

A medição em média tensão exige dispositivos que efetuem medidas de forma indireta. Desta forma, o uso de transformadores de corrente e de tensão é a solução mais indicada.

Os transformadores TCs reduzem as correntes do circuito para uma faixa de valores normalizados de medição. Os transformadores TPs funcionam como redutores de tensões da ordem de kV para valores da ordem de 115 V.

Os sinais de tensão e corrente são as entradas para o medidor de energia que calcula e registra as energias ativa, reativa e a demanda. O medidor, por possuir memória de armazenamento, permite o levantamento do perfil de carga da instalação.

O equipamento deve ter uma interface serial com o modem ou *gateway* que procede a transmissão dos dados da maneira configurada pela concessionária.

5.4 Características do modem

Depois de monitorar os dados, os mesmos são enviados a um modem que, para este tipo de comunicação, deve contar com as seguintes características descritas a seguir.

O modem é utilizado para a transmissão de dados de forma prática e segura, através da tecnologia celular GPRS. Permite ao usuário utilizar variados recursos de comunicação, conexões à internet, entre máquinas e aplicações em comunicação móvel/*wireless*.

O Modem conta também com uma estrutura que engloba não só os dispositivos instalados e remotos, como também uma plataforma central e robusta, que permite a integração dos dados e informações coletadas, assim como os comandos enviados com qualquer sistema corporativo pré-existente.

Todos os dados coletados são convertidos e transmitidos via rede em terminais de unidades remotas (RTU) em todas as tecnologias disponíveis GSM/GPRS, depois eles são enviados à rede celular e posteriormente para internet e por fim os dados são encaminhados a central de controle.

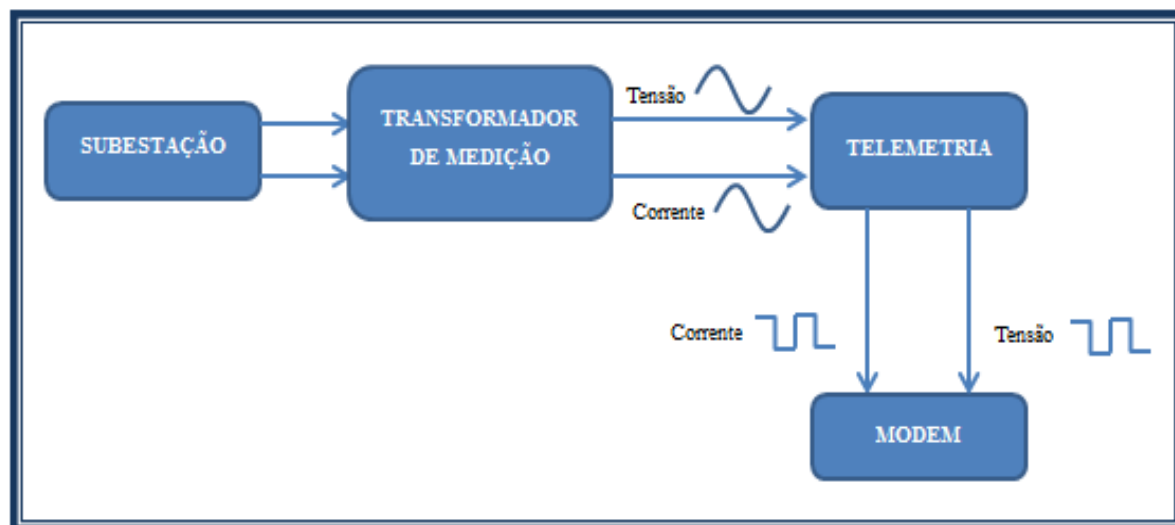
Os requisitos principais para o modem devem ser:

- Adaptador entre uma conexão de internet e a porta serial RS232, bidirecional.
- Operação que gerencia automaticamente a conexão à rede GPRS e o servidor de supervisão, através da internet ou redes privadas.
- Compatível com a maioria dos protocolos industriais de telemetria e automação, como DNP3.
- Parâmetros de conexão e de lógica de funcionamento configuráveis, armazenados em memória não volátil. Possibilidade de configuração via porta serial ou remotamente via internet (GPRS).

5.5 Análise de estudo de caso em geral

Uma vez que os dados foram adquiridos da subestação, por intermédio do transformador de medição, eles são enviados a telemetria por uma interface analógica. Então, os mesmos são convertidos novamente para o sinal digital para encaminhamento ao modem. Este faz a transmissão através do protocolo DNP3, conforme descrito no Capítulo 4. Na Figura 40, apresenta-se a topologia de aquisição de dados e envio ao modem.

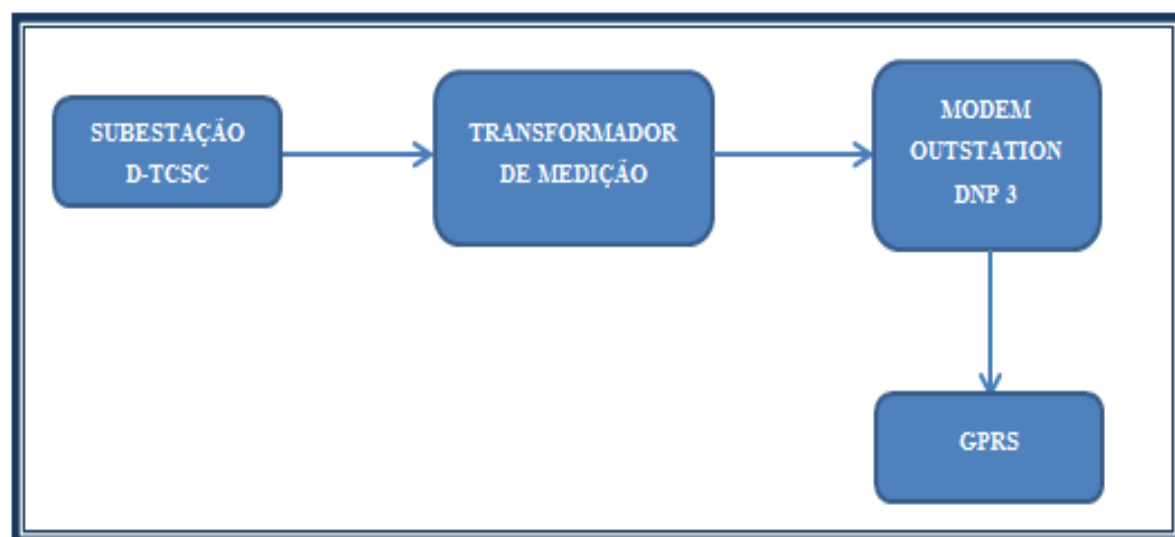
Figura 40 — Topologia de aquisição de dados e envio ao modem.



Fonte:Elaboração do autor.

O dispositivo *outstation* pode enviar os dados coletados, respondendo a requisições do centro de controle ou transmissão mensagens não solicitadas pelo sistema. A comunicação entre D-TCSC e a rede GPRS é ilustrada na Figura 41.

Figura 41 — Comunicação entre D-TCSC e a rede GPRS



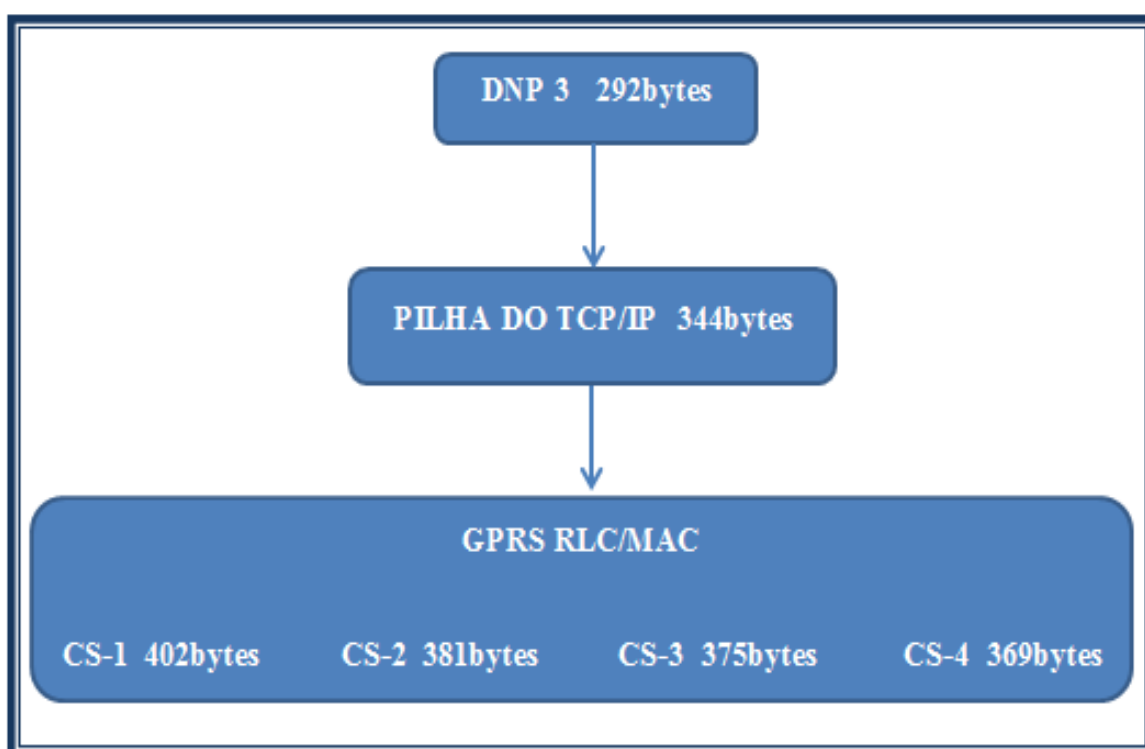
Fonte:Elaboração do autor.

Considerando que o dispositivo *outstation* precise efetuar a transmissão dos dados em um datagrama DNP3 de tamanho máximo (292 bytes), a Figura 42 descreve o encapsulamento desse datagrama e demonstra qual será o tamanho do quadro GPRS.

O tamanho do quadro depende do esquema de codificação que foi descrito na seção 4.7. Sendo assim o CS-1, por fornecer maior confiabilidade, é o esquema que gera um quadro maior. Entretanto, por fornecer menor confiabilidade, o CS-4 gera um quadro menor.

De acordo com o tamanho que os quadros atingem, pode-se calcular o tempo de transmissão de cada um, conforme o Quadro 6, e avaliar se o mesmo esta dentro dos requisitos estabelecidos pela norma IEEE 2030. Esta norma regulamenta que a latência em aplicações SG de teleproteção de subestações não deve ultrapassar o limiar de 16 ms.

Figura 42 — Encapsulamento do datagrama DNP3 no cenário proposto.



Fonte: Elaboração do autor.

Quadro 6— Análise do tempo de transmissão dos quadros DNP3 encapsulados em GPRS

GPRS								
	CS1		CS2		CS3		CS4	
Quadros DNP3	Quadro	Tempo	Quadro	Tempo	Quadro	Tempo	Quadro	Tempo
28	96	4,42	90	4,14	90	4,14	87	4
46	117	5,38	111	5,11	108	4,97	105	4,83
64	138	6,35	129	5,93	129	5,93	126	5,8
82	159	7,31	150	6,9	147	6,76	144	6,62
100	177	8,14	171	7,86	168	7,73	165	7,59
118	198	9,1	189	8,69	186	8,55	183	8,41
136	219	10,07	210	9,66	207	9,52	201	9,24
154	240	11,03	231	10,62	225	10,35	222	10,21
172	261	12	249	11,45	246	11,31	240	11,03
190	282	12,96	270	12,41	264	12,14	258	11,86
208	303	13,93	288	13,24	285	13,1	279	12,83
226	324	14,89	309	14,21	303	13,93	297	13,65
244	345	15,86	330	15,17	324	14,89	318	14,62
262	366	16,82	348	16	342	15,72	336	15,45
280	387	17,79	369	16,96	363	16,69	354	16,27
292	402	18,48	381	17,51	375	17,24	369	16,96

Legenda: Quadros expressos em *bytes* e tempo expresso em ms.

Fonte:Elaboração do autor.

O Quadro 6 mostra o tamanho do quadro de DNP3 ate a rede celular e faz um comparativo entre os sistemas de codificação GPRS, verificando qual limite do tamanho do quadro DNP3 possibilita um tempo de transmissão dentro dos requisitos da norma IEEE 2030.

Sendo assim, na codificação CS1 pode-se observar que o quadro DNP3 não deve exceder o tamanho 244 bytes. Seguindo o mesmo raciocínio os quadros DNP3 não podem ultrapassar 262 bytes de tamanho para as outras três codificações.

A fim de garantir transmissões dentro dos requisitos, deve-se evitar a formação de quadros DNP3 maiores. Para efetuar tal tarefa, a aplicação SG deve diminuir o intervalo entre as transmissões para a central de controle.

Apesar de permitir uma comunicação dentro dos requisitos, a tecnologia GPRS pode apresentar limitações na transmissão de grandes quantidades de dados. Entretanto, devido a

localização do estudo de caso, a utilização dessa tecnologia é a mais adequada, levando-se em consideração a área de cobertura da rede. Em outras situações, onde a cobertura das redes 3G e 4G são possíveis, recomenda-se a sua utilização devido a possuírem maiores taxas de transmissão que a tecnologia GPRS. Assim as aplicações de teleproteção terão garantido seu desempenho dentro dos requisitos estabelecidos.

6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho apresentou a proposta de comunicação de um compensador série desde a rede de distribuição até chegar ao centro de controle mediante a filosofia de SG.

E, por isso, o foco de pesquisa foi fazer um levantamento bibliográfico das tecnologias que estão sendo utilizadas atualmente em comunicação da rede elétrica mediante o conceito de rede inteligente.

Para que se entendam os aspectos que diferenciam o SG da tecnologia utilizada atualmente para gerenciamento de energia elétrica, é importante, em um primeiro momento, conceituar as redes inteligentes de energia. De forma resumida, pode-se dizer que o SG é uma arquitetura de sistemas de energia que utiliza massivamente os sistemas de tecnologia de informação e comunicação (TIC) para distribuir energia elétrica de forma eficiente, confiável e segura.

No trabalho apresentou os tipos de equipamentos FACTS e se definiu um modelo de compensador série o qual será instalado na distribuição D-TCSC para ser monitorado por intermédio da arquitetura de SG até o centro de controle.

O GPRS foi a tecnologia proposta para a utilização de estudo de caso já que a subestação esta localizada em uma zona rural e distante do centro urbano. Em tal escopo de localização remota, as redes celulares aparecem como uma solução de baixo custo, pois a infraestrutura de cobertura de sinal já se encontra implementada em diversos locais, quando comparado a enlaces de fibra ótica.

Para analisar a rede GPRS, foi estudado um comparativo de encapsulamento DNP3 com diferentes esquemas de codificação para assim avaliar se esta tecnologia está dentro dos requisitos para esse tipo de comunicação com a SG. Tal avaliação constatou que o GPRS pode aparentar restrições em quadros maiores de 244 bytes do DNP3, pois, de acordo com a norma de IEEE 2030, as transmissões ultrapassam o limite de 16 ms, se tornando assim inadequadas para aplicações de teleproteção de subestações. Entretanto, para transmissões de menores quantidades de dados, a tecnologia GPRS torna-se factível.

Apesar de constatar que a tecnologia GPRS tem características que permitem uma comunicação dentro dos requisitos, pode-se afirmar que, devido à velocidade de transmissão ser maior, as tecnologias 3G e 4G trarão melhor desempenho a estas aplicações quando a área de cobertura alcançar maiores distâncias.

As análises feitas neste trabalho foram de cunho teórico. Como trabalhos futuros precisa-se que sejam realizadas análises de desempenho em ambientes simulados ou reais. Observasse ainda que a tecnologia GPRS necessita de avaliações dos mecanismos de segurança para operação em ambientes críticos como subestações, por exemplo.

Faz-se necessária, ainda, uma análise das tecnologias 3G e 4G em aplicações de cenários semelhantes, a fim de melhorar o desempenho da comunicação entre as subestações e centrais de controle das concessionárias.

Pretende-se aplicar a proposta realizada por este trabalho em outros ramais de alimentação.

REFERÊNCIAS

- 1 MANZANO, R. A. P. **Utilização de conversores como fonte de tensão no controle de fluxo de potência**. 2004. 167 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2004.
- 2 JESUS, N. C. et al. Modelagem e simulação dinâmica do TCSC utilizando o programa de transitórios eletromagnéticos microtran para estudos de qualidade de energia. In: SEMINÁRIO BRASILEIRO SOBRE QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA, 5., 2003, Aracaju. **Anais...** Aracaju: SBQEE, 2003. p. 1-6.
- 3 CPQD.**O CPqD**. Campinas: [s.n.], 2013. Disponível em: <<http://www.cpqd.com.br>>. Acesso em: 15 jan. 2013.
- 4 HINGORANI, N. G. High power electronics and flexible ac transmission systems. **IEEE Power Engineering Review**, Piscataway, v. 8, n. 7, p. 3-4, July 1988.
- 5 LARSEN, E.; TORGERSON, D. **FACTS Overview**. Piscataway: IEEE, 1995.(IEEE PES Special Publication, 95-TP-108).
- 6 AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **Resolução Normativa nº 469, de 13 de dezembro de 2011**. Aprova a Revisão 4 dos módulos 1 e 8 e Revisão 5 do Módulo 6 dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST. Brasília-DF, 2011.
- 7 BORILLE FOGAÇA, A. L. **Análise de controladores FACTS em sistemas de energia elétrica**. 2006. 90 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Engenharia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.
- 8 MIOTTO, E. L. **Análise da estabilidade dinâmica de sistemas elétricos de potência multimáquinas com dispositivos FACTS TCSC e controladores**. 2010. 137 f. Tese (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2010.
- 9 IESA PROJETOS, EQUIPAMENTOS E MONTAGENS. Grupo VIII - Grupo de Estudo de Subestações e Equipamentos Elétricos – GSE. **Compensação série em sistemas de distribuição e subtransmissão: novas tecnologias de controle e proteção**. Araraquara, 2012. 7 p. Disponível em: <http://www.iesa.com.br/web/pdf/pdf_reativa/art_compSerie_NvasTecno.pdf>. Acesso em: 15 nov. 2012.
- 10 WATANABE, E. H. et al. Tecnologia Facts: tutorial. **SBA Controle & Automação**, Campinas, v. 9. n. 1, p. 39-55, 1998.
- 11 ADAPA, R. et al. Proposed terms and definitions for flexible ac transmission system (FACTS). **IEEE Transactions on Power Delivery**, Piscataway, v. 12, n. 4, p. 1848-1853, Oct. 1997.

- 12 SIQUEIRA, D. S. **Controle não linear aplicado a dispositivos FACTS em sistemas elétricos de potência**. 2012. 94 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Engenharia, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.
- 13 MASUDA, M. **Aplicação do dispositivo FACTS em sistemas de distribuição**. 2006. 68 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.
- 14 PATLEY, S.; POOSAM, B. P. How TCSC controller benefit AC transmission line for voltage stability. **International Journal of Scientific & Engineering Research**, Houston, v. 3, n. 8, p. 1195-1197, Aug. 2012.
- 15 POWER SYSTEMS & HIGHT VOLTAGE LABORATORIES – EEH. **FACTS flexible alternating current transmission systems**. Zurich: [s. n.], 2012. Disponível em: <www.eeh.ee.ethz.ch/>. Acesso em: 18 set. 2012.
- 16 BINDESHWAR, S. Applications of facts controllers in power systems for enhance the power system stability: a state-of-the-art. **International Journal of Reviews in Computing**, Islamabad, v. 6, n. 3, p. 40-69, July 2011.
- 17 GEORGILAKIS, P. S.; VERNADOS, P. G. Flexible ac transmission system controllers: an evaluation. **Materials Science Forum**, Stafa-Zurich, v. 670, n. 12, p. 399-406, 2011.
- 18 NASCIMENTO, D. G. **Desempenho do relé de distância em linhas de transmissão compensadas com TCSC**. 2007. 150 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia - COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.
- 19 MISKE, S. A. Considerations for the application of series capacitors to radial power distribution circuits. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Piscataway, v. 16, n. 2, p. 2607, Apr. 2001.
- 20 JESUS, N. C. et al. Considerações sobre aplicação de compensação série em sistemas de distribuição visando melhoras na qualidade de energia. In: SEMINÁRIO BRASILEIRO SOBRE QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA, 5., 2003, Aracaju. **Anais...** Aracaju: SBQEE, 2003.
- 21 CAPELLETTE, R. F. **Estudo dos efeitos da compensação série no desempenho transitório dos sistemas de energia elétrica sob o enfoque da energia**. 2012. 73 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2012.
- 22 MOSCHAKIS, M. N.; LEONIDAKI, E. A.; HATZIARGYRIOU, N.D. Considerations for the application of thyristor controlled series capacitors to radial power distribution circuits. In: IEEE BOLOGNA POWER TECH CONFERENCE, 2003, Bologna. **Proceedings...** Piscataway: IEEE, 2003. v. 3, 7 p.
- 23 JEWELL, W. et al. **Communication requirements and integration options for smart grid deployment**: final report. Kansas: Power Systems Engineering Research Center, 2012. 165p.

- 24 EUROPEAN COMMISSION. Work Package 2.3 Research Smart Grid. **Communication protocols and infrastructures to incorporate data security measures**: expert group on the security and resilience of communication networks and information systems for smart grids. Version 1.3. Bruxelles: [s.n], 2012. 76p.
- 25 FUJII, S. Y.; BOARDMAN, E. Evolução de protocolos de comunicação. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE AUTOMAÇÃO DO SETOR ELÉTRICO, 8., 2009, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: [s.n.], 2009. 41 p. Disponível em: <<http://www.zonaeletrica.com.br/downloads/ctee/simpase2009/minicurso2/02-Protocolos.pdf>>. Acesso em: 14 set. 2012.
- 26 ASEA BROWN BOVERI - ABB. **DNP3 communication protocol manual**. Vasteras: [s.n], 2011. 60 p. Disponível em: <[www05.abb.com/global/scot/scot354.nsf/veritydisplay/5b0552a1511e3d9ac125783a004549d7/\\$file/1mrk511241-uen_-_en_communication_protocol_manual__dnp__650_series__iec.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot354.nsf/veritydisplay/5b0552a1511e3d9ac125783a004549d7/$file/1mrk511241-uen_-_en_communication_protocol_manual__dnp__650_series__iec.pdf)>. Acesso em: 14 set. 2012.
- 27 BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Grupo de Trabalho de Redes Elétricas Inteligentes. **Smart Grid**: relatório. Brasília-DF: [s.n.], 2010. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/mme/galerias/arquivos/acoes/Energia/Relatxrio_GT_Smart_Grid_Portaria_440-2010.pdf>. Acesso em: 15 set. 2012.
- 28 TRIANGLE MICRO WORKS. **Modbus and DNP3 communication protocols**. Raleigh: [s.n], 2012. Disponível em: <http://www.trianglemicroworks.com/documents/Modbus_and_DNP_Comparison.pdf>. Acesso em 8 set. 2012.
- 29 PIIRAINEN, J. **Applications of horizontal communication in industrial power networks**. 2010. 62 f. Tese (Mestrado em Ciências) - Faculdade de Engenharia, Tampere University of Technology, Council, 2010.
- 30 NEWTON, C. W. Trends and Outlook: EMS, SCADA and DMS. **Power Grid International**, Tulsa, v. 14, n. 2, p. 1-3, 2009. Disponível em: <http://www.elp.com/articles/powergrid_international/print/volume-14/issue-2/features/trends-and-outlook-ems-scada-amp-dms.html>. Acesso em: 8 set. 2012.
- 31 RAMALHO, L. A. et al. Modeling of state machines in VHDL for encapsulation of DNP3 protocol in P2P ZigBee network. In: IEEE PES CONFERENCE ON INNOVATIVE SMART GRID TECHNOLOGIES LATIN AMERICA – ISGT LA, 2013, São Paulo. **Proceedings...** Piscataway: IEEE, 2013. 8 p.
- 32 MADERA, M. J.; CANIZALES, E.A. The GPRS communication platform and DNP protocol as the best choices to communicate the SCADA with IEDs in the EDC distribution network. In: IEEE/PES TRANSMISSION DISTRIBUTION CONFERENCE AND EXPOSITION: LATIN AMERICA, 2006, Caracas. **Proceedings...** Piscataway: IEEE, 2006. 4 p.

- 33 RAMALHO, L. Modelagem de máquinas de estado de dispositivos DNP3 em VHDL. In: CONFERÊNCIA BRASILEIRA SOBRE QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA – CBQEE, 2013, Araxá. **Anais...** Araxá: SBQEE, 2013.
- 34 SONG, Y. H.; JOHNS, A. T. **Flexible a transmission systems**(FACTS). London: The Institution of Electrical Engineers, 1999. p. 30-199.
- 35 GYUGYI, L. Converter-Based FACTS Technology: electric power transmission in the 21st century. **IPEC 2000**, v.1, n. 1, p. 15-26, Tokyo, 2000.
- 36 GYUGYI, L.; EKSTROM, A.; CHRISTL, N. Conversores controlados por tensão e capacitores série CCAT. In: CURSO E WORKSHOP CIGRÉ BRASIL, CE, 14., 2000, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: [s.n], 2000.
- 37 SILVA, C.; BRAEGGER, R.; SILVA, S. **FACTS e a Estabilidade: dinâmica e estabilidade de sistemas eléctricos**. 2005. 36 f. Dissertação (mestrado em engenharia electrotécnica e Computadores) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2005.
- 38 AMIN, S. M.; WOLLWENBERG, B. F. Towarda Smart Grid. **IEEE Power & Energy Magazine**, Piscataway, v. 3, n. 5, p. 34-38, Sept./Oct. 2005.
- 39 GUNGOR, V. C. et al. Smart Grid technologies: communication technologies and standards. **IEEE Transactions on Industrial Informatics**, Piscataway, v. 7, n. 4, p. 529-539, Nov. 2011.
- 40 JAMIAN, J. J. et al. Smart grid communication concept for frequency control in distribution system. In: INTERNATIONAL POWER ENGINEERING AND OPTIMIZATION CONFERENCE, 5., 2011, Shah Alam. **Proceedings...** Piscataway: IEEE, June 2011. p. 238-242.
- 41 GRIMMER, R.; LOB, D.; PUZIO, M.; SOUTO, H. **Acceso por redes cableadas: transmisión de datos sobre redes de electricidad**. [S. l.]: [s. n.], 2005.
- 42 SHREYAS, A. **Analysis of communication protocols for neighborhood are a net work for smart grid**. 107 f. Dissertação (Master of Science in Computer Engeering) – California State University, Sacramento, 2010.
- 43 GUENUL, O. **Introducción a redes**. [S. l.]: [s. n.], 2012. Disponível em: <<http://www.monografias.com/trabajos5/redwan/redwan.shtml#intro>>. Acesso em: 1 set. 2012.
- 44 FAN, Z. et al. Smart grid communications: overview of research challenges, solutions, and standardization activities. **IEEE Communications Surveys&Tutorials**, Piscataway, v. 15, n. 1, p. 21-38, 2013.
- 45 VARGAS, A. A. **Estudo sobre comunicação de dados via rede elétrica para aplicações de automação residencial/predial**. 2004. 65 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Computação) – Escola de Engenharia, Instituto de Informática, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

- 46 BETTSTETTER, C.; VÖGEL, H.; EBERSPÄCHER, J. GSM phase 2+general packet radio service GPRS:architecture, protocols,and air interface. **IEEE Communications Surveys and Tutorials**, Piscataway, v. 2, n. 3, p. 2-14, 1999.
- 47 DIAS, R. A. et al. Gestão de energia elétrica pelo lado da demanda empregando arquitetura orientada a serviços sobre tecnologias GPRS e PLC. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE AUTOMAÇÃO DO SETOR ELÉTRICO, 8., 2009, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: [s.n.], 2009. 11 p. Disponível em: <<http://www.nersd.ifsc.edu.br/>>. Acesso em: 8 set. 2012.
- 48 TATEOKI, G. T. **Monitoramento de dados via internet baseado em telefonia celular**. 2007. 123 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2007.
- 49 TRIANGLE MICRO WORKS. **DNP3 overview**. Revision 1.2. Raleigh: [s.n], 2002. 5 p. Disponível em: <http://www.trianglemicroworks.com/documents/DNP3_Overview.pdf>. Acesso em: 8 set. 2012.
- 50 DNP USERSGROUP. **A DNP3 Protocol Primer**. Revision A. Raleigh: [s.n], 2005. 8 p. Disponível em: <<http://www.dnp.org/aboutus/dnp3%20primer%20rev%20a.pdf>>. Acesso em: 8 set. 2012.
- 51 SCHEIDER ELECTRIC BRASIL. **Sepam Comunicação DNP3: proteção de redes elétricas: manual de utilização**. São Paulo: [s.n], 2009. 55 p. Disponível em: <[http://www.global-download.schneider-electric.com/852575770039EC5E/all/BBBA669DFA08841C8525766500695708/\\$File/siped305001br.pdf](http://www.global-download.schneider-electric.com/852575770039EC5E/all/BBBA669DFA08841C8525766500695708/$File/siped305001br.pdf)>. Acesso em: 8 set. 2012.
- 52 McDONALD, J. D. **Electric power substations engineering**. Boca Raton: CRC Press, 2003. p.8.
- 53 MASSAD, B.; SANTOS, M. **Sistema SCADA supervisório**. Campos dos Goytacazes: Instituto Federal Fluminense de Educação Ciência e Tecnologia, 2008.
- 54 UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ. Núcleo de Processamento de Dados. Central de Atendimento ao Usuário. **Instruções para configuração do servidor Proxy**. Maringá: [s. n], 2012. 4 p. Disponível em: <<http://www.uem.br/dicas/wifi/ProxyUEMnosNavegadores.pdf>>. Acesso em: 15 out. 2012.
- 55 GUIMARAES, R. **ADO.NET 2.0: a importância do Pool de conexões**. [S. l.]: [s.n], 2012. Disponível em: <<http://www.linhadecodigo.com.br/artigo/1254/adonet-20-a-importancia-do-pool-de-conexoes.aspx>>. Acesso em: 15 out. 2012.
- 56 SOUZA, J. **Modem celular para automação remota**. [S.l.]: [s.n.], 2010.
- 57 OLIVEIRA, J. P. et al. Análise de desempenho de TCP sobre GPRS em um Ambiente Fim a Fim. In: WORKSHOP DE COMUNICAÇÃO SEM FIO - WCSF, 2004, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza: [s.n.], 2004. 10 p. Disponível em: <<http://www.cin.ufpe.br/~cak/publications/wcsf2004.pdf>>. Acesso em: 8 set. 2012.

- 58 IEEE POWER AND ENERGY SOCIETY. **IEEE Standard for Electric Power Systems Communications: distributed network protocol (DNP3)**, Std 1815. New York: [s. n.], 2010. 745 p.
- 59 UNIVERSITY OF SOUTHERN CALIFORNIA. Information Sciences Institute. **Internet Protocol**: darpa internet program, protocol specification. Arlington: [s. n.], 1981. (RFC: 791). Disponível em: <<http://www.ietf.org/rfc/rfc791.txt>>. Acesso em: 8 set. 2012.
- 60 UNIVERSITY OF SOUTHERN CALIFORNIA. Information Sciences Institute. **Transmission Control Protocol**: darpa internet program, protocol specification. Arlington: [s.n], 1981. (RFC: 793). Disponível em: <<http://www.freessoft.org/CIE/RFC/793/>>. Acesso em: 8 set. 2012.
- 61 IEEE POWER AND ENERGY SOCIETY. **IEEE Logical Link Control (LLC): Std 802.2**. New York: [s.n], 1985. 116 p.
- 62 HEINE, G.; SAGKOB, H. **GPRS: gateway to third generation mobile networks**. 2. ed. Boston: ArtechHouse, 2003.
- 63 WAGENTRISTL, K. **GPRS performance evaluation**. 2004. 122 f. Tese (Doutorado em Tecnologia) – Instituto de Notícias de Tecnologia e Tecnologia de Alta Frequência, Universidade Técnica de Viena, Viena, 2004.
- 64 PROTOCOLO de comunicaciones DNP3. [S.l]: Micro-designs, 2009. Disponível em: <<http://www.micros-designs.com.ar/protocolo-de-comunicaciones-dnp3/>>. Acesso em: 8 dez. 2010.