

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO OESTE DO PARANÁ  
CAMPUS FOZ DO IGUAÇU  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
ENGENHARIA DE SISTEMAS DINÂMICOS E ENERGÉTICOS

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**ARQUITETURA FÍSICA E LÓGICA DE UMA SMART MICROGRID PARA A  
GESTÃO INTEGRADA DA ENERGIA: UM MODELO PARA O PARQUE  
TECNOLÓGICO ITAIPU**

LUCIANO MAURO ARLEY SUP

FOZ DO IGUAÇU  
2012



Luciano Mauro Arley Sup

**Arquitetura Física e Lógica de uma Smart Microgrid para a Gestão Integrada da Energia: Um Modelo Para o Parque Tecnológico Itaipu**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Sistemas Dinâmicos e Energéticos como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Sistemas Dinâmicos e Energéticos. Área de concentração: Sistemas Dinâmicos e Energéticos.

Orientador: Dr. Roberto Cayetano Lotero

Foz do Iguaçu  
2012

**FICHA CATALOGRÁFICA**

S959 Sup, Luciano Mauro Arley

Arquitetura física e lógica de uma smart microgrid para a gestão integrada da energia : um modelo para o Parque Tecnológico de Itaipu / Luciano Mauro Arley Sup. – Foz do Iguaçu, 2012.

109 p.: il.

Orientador: Prof. Dr. Roberto Cayetano Lotero.

Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Sistemas Dinâmicos e Energéticos - Universidade Estadual do Oeste do Paraná.

1. Recursos energéticos – Sistema de gestão integrada. 2. Automação e controle industrial. 3. Microrredes inteligentes. 4. *Smart Grid* – Arquitetura – Laboratório vivo. I. Título.

CDU 620.91  
62-52

# **Arquitetura Física e Lógica de uma Smart Microgrid para a Gestão Integrada da Energia: Um Modelo Para o Parque Tecnológico Itaipu**

Luciano Mauro Arley Sup

Esta Dissertação de Mestrado foi apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Sistemas Dinâmicos e Energéticos e aprovada pela Banca Examinadora:  
Data da defesa pública: 20/04 /2012.

---

Prof. Dr. Roberto Cayetano Lotero – (Orientador)  
Universidade do Oeste do Paraná – UNIOESTE

---

Prof. Dr. Romeu Reginatto  
Universidade do Oeste do Paraná – UNIOESTE

---

Prof. Dr. Delberis Araújo Lima  
Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUC



# Resumo

No presente trabalho apresenta-se uma arquitetura física e lógica de uma microrrede inteligente com o objetivo de realizar a gestão integral da energia dos diversos Recursos Energéticos Distribuídos (REDs) de uma organização. Nesse sentido, inicialmente é proposto um Sistema de Gestão Integral da Energia (SGIE), através do qual são definidas as estratégias de atuação para a supervisão e controle dos REDs, o que permite identificar as necessidades e requisitos a serem atendidos pela arquitetura tecnológica. Posteriormente o trabalho apresenta os conceitos de microrredes e como o sistema de monitoramento e controle contribuiria no gerenciamento eficiente, efetivo e eficaz dos diversos recursos energéticos, seja na produção, na transformação ou no uso final, buscando que os mesmos estejam integrados à operação da microrrede. O paradigma apresentado está enquadrado na nova visão dos sistemas elétricos, conhecida como *Smart Grid* ou rede inteligente. Essas redes inteligentes podem ser formadas a partir da união de bolsões de sub-redes, denominadas *Smart  $\mu$ Grid*, das quais são apresentados os principais conceitos, requisitos e tecnologias viabilizadoras. Finalmente, é apresentada a proposta de arquitetura para uma *Smart  $\mu$ Grid*, ambientada no Parque Tecnológico Itaipu, a qual tem a finalidade de atender as necessidades do SGIE do mesmo, porém, fundamentalmente, o que se busca é que funcione como um laboratório vivo, através do qual será possível apreender conceitos de *Smart Grid* atuando sobre ela.

*Palavras chaves:* Gestão Integral da Energia. Automação e Controle Industrial. Laboratório Vivo. Microrredes. *Smart Grid*.

# Abstract

This work presents a physical and logical architecture of an intelligent Micro-Grid in order to perform the integrated energy management of the various distributed energy resources (REDs) of an organization. In this way, it is initially proposed an Integrated Energy Management System (SGIE), through which defines the action strategies for the supervision and control of the REDs, which identifies the needs and requirements to be met by the technology architecture. Subsequently, the document presents the concepts of Micro-Grid and how the monitoring and control system would help in the efficient and effective use of various energy resources in production, transformation or end use, to ensure that they are integrated into the operation of Micro-Grid. The presented paradigm is framed in new vision of power systems, known as Smart Grid. These smart grids might be formed from the union of several sub-networks package, called Smart  $\mu$ Grid, whose main concepts, requirements and technologies necessary to build are presented. Finally, it is presented a proposal for a Smart  $\mu$ Grid architecture, set in the Itaipu Technological Park, which aims to meet the need of its SGIE, but basically it is thought to work as a living laboratory in which it will be possible to learn concepts of smart grid acting on it.

*Keywords:* Integrated Energy Management. Automation and Control. Living Laboratory. Micro Grid. Smart grid.

Dedicado a הוהי, O Engenheiro que criou  
o universo em sete dias.



# Agradecimentos

Tenho muito que agradecer. A começar pelo fato de existir e poder viver com saúde, nesse ponto eu agradeço inicialmente ao autor da vida, O Rei de reis e Senhor de senhores, O grande e soberano Jesus.

Agradeço também aos meus pais, Pedro Sup e Tereza Marostega que mesmo sendo camponeses quase analfabetos, tenham sido meus primeiros e grandes *maestros*, deles tenho aprendido princípios e valores que fazem parte fundamental da minha formação.

Agradeço muito ao meu orientador Dr. Roberto C. Lotero por seu grande empenho e dedicação na orientação deste trabalho e por sua amizade.

Agradeço à Fundação Parque Tecnológico Itaipu (FPTI) pela bolsa de estudos.

Agradeço aos alunos de iniciação científica Fernando M. Wittmann e João Montemezzo pelas fotos cedidas para a elaboração de este trabalho e pelo companheirismo e trabalho em conjunto.

E agradeço a todos os professores e alunos do PGESDE e todas as pessoas que tenham contribuído de forma direta ou indireta para a realização deste trabalho.

A todos, Muito Obrigado!



# Sumário

|                                                                                        |             |
|----------------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| <b>LISTA DE FIGURAS .....</b>                                                          | <b>XIII</b> |
| <b>LISTA DE TABELAS .....</b>                                                          | <b>XV</b>   |
| <b>LISTA DE SÍMBOLOS .....</b>                                                         | <b>XVII</b> |
| <b>CAPÍTULO 1 .....</b>                                                                | <b>1</b>    |
| <b>INTRODUÇÃO .....</b>                                                                | <b>1</b>    |
| 1.1 A GESTÃO ENERGÉTICA E A MICRORREDE INTELIGENTE .....                               | 1           |
| 1.2 MOTIVAÇÃO .....                                                                    | 5           |
| 1.3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....                                                        | 5           |
| 1.4 PROPOSTA DO TRABALHO .....                                                         | 7           |
| 1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO .....                                                        | 8           |
| <b>CAPÍTULO 2 .....</b>                                                                | <b>9</b>    |
| <b>GESTÃO INTEGRADA DA ENERGIA .....</b>                                               | <b>9</b>    |
| 2.1 A GESTÃO ENERGÉTICA COMO CULTURA ORGANIZACIONAL .....                              | 10          |
| 2.2 A NORMA ABNT NBR ISO 50001 .....                                                   | 10          |
| 2.2.1 Requisitos Gerais do Sistema de Gestão da Energia .....                          | 11          |
| 2.2.2 Responsabilidade da Direção .....                                                | 12          |
| 2.2.3 Política Energética .....                                                        | 13          |
| 2.2.4 Planejamento Energético .....                                                    | 13          |
| 2.2.5 Implementação e Operação .....                                                   | 15          |
| 2.2.6 Verificação .....                                                                | 15          |
| 2.2.7 Revisão da Alta Direção .....                                                    | 16          |
| 2.3 SISTEMA DE GESTÃO INTEGRADA DA ENERGIA .....                                       | 16          |
| 2.3.1 Decisão Estratégica .....                                                        | 17          |
| 2.3.2 Instalação do SGIE .....                                                         | 20          |
| 2.3.3 Operação do SGIE .....                                                           | 24          |
| 2.4 SISTEMA DE CONTROLE PARA A GESTÃO DA ENERGIA .....                                 | 26          |
| 2.4.1 Requisitos do EMCS .....                                                         | 26          |
| 2.4.2 Funções e Benefícios do EMCS .....                                               | 27          |
| 2.4.3 Ações estratégicas dos EMCS .....                                                | 27          |
| 2.4.4 Gestão pelo lado da demanda .....                                                | 29          |
| 2.4.5 Algoritmos de Controle de Carga .....                                            | 29          |
| 2.5 CONCLUSÃO .....                                                                    | 30          |
| <b>CAPÍTULO 3 .....</b>                                                                | <b>31</b>   |
| <b>REQUISITOS TECNOLÓGICOS PARA A VIABILIZAÇÃO DE UMA MICRORREDE INTELIGENTE .....</b> | <b>31</b>   |
| 3.1 MICRO REDES .....                                                                  | 31          |
| 3.2 REDES INTELIGENTES - SMART GRID .....                                              | 34          |
| 3.3 SMART MGRID .....                                                                  | 40          |
| 3.4 ARQUITETURAS DE CONTROLE .....                                                     | 42          |
| 3.4.1 Controle Digital Direto ou DDC .....                                             | 42          |
| 3.4.2 Field Area Network (FAN) .....                                                   | 43          |
| 3.5 SISTEMAS DE COMUNICAÇÃO .....                                                      | 50          |
| 3.5.1 Protocolos de comunicação .....                                                  | 50          |
| 3.5.2 Meios Físicos de Comunicação .....                                               | 52          |
| 3.5.3 Meios de Comunicação Sem Fio .....                                               | 57          |
| 3.5.4 Infraestrutura Automática de Medição - AMI .....                                 | 63          |

|                                                                              |                                                                                   |            |
|------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 3.5.5                                                                        | <i>Infraestrutura de Atuação e Controle</i>                                       | 70         |
| 3.6                                                                          | CONCLUSÃO                                                                         | 72         |
| <b>CAPÍTULO 4</b>                                                            |                                                                                   | <b>73</b>  |
| <b>UM MODELO SMART <math>\mu</math>GRID PARA O PARQUE TECNOLÓGICO ITAIPU</b> |                                                                                   | <b>73</b>  |
| 4.1                                                                          | INTRODUÇÃO                                                                        | 73         |
| 4.2                                                                          | CARACTERÍSTICAS DO PARQUE TECNOLÓGICO ITAIPU                                      | 74         |
| 4.3                                                                          | ARQUITETURA DE REDE                                                               | 77         |
| 4.3.1                                                                        | <i>Nível de Campo</i>                                                             | 79         |
| 4.3.2                                                                        | <i>Nível de Controle</i>                                                          | 79         |
| 4.3.3                                                                        | <i>Nível de Gerenciamento</i>                                                     | 83         |
| 4.4                                                                          | FUNÇÕES DA REDE                                                                   | 89         |
| 4.4.1                                                                        | <i>Monitoramento em Tempo Real</i>                                                | 90         |
| 4.4.2                                                                        | <i>Controle de Demanda em Tempo Real</i>                                          | 90         |
| 4.4.3                                                                        | <i>Controle de Consumo em Tempo Real</i>                                          | 92         |
| 4.4.4                                                                        | <i>Controle de Fator de Potência</i>                                              | 93         |
| 4.4.5                                                                        | <i>Gerenciamento dos Recursos Energéticos Distribuídos</i>                        | 93         |
| 4.4.6                                                                        | <i>Implantação de Elementos Armazenadores</i>                                     | 94         |
| 4.4.7                                                                        | <i>Plataforma de Integração com Veículos Elétricos</i>                            | 95         |
| 4.4.8                                                                        | <i>Acionamento de Alarmes</i>                                                     | 95         |
| 4.4.9                                                                        | <i>Reconfiguração Automática do Arranjo de Conexões dos Circuitos Monofásicos</i> | 96         |
| 4.5                                                                          | ESTADO ATUAL DA SMART $\mu$ GRID NO PARQUE TECNOLÓGICO ITAIPU                     | 96         |
| 4.5.1                                                                        | <i>Conclusão</i>                                                                  | 98         |
| <b>CAPÍTULO 5</b>                                                            |                                                                                   | <b>99</b>  |
| <b>CONCLUSÃO</b>                                                             |                                                                                   | <b>99</b>  |
| 5.1.1                                                                        | <i>Trabalhos Futuros</i>                                                          | 100        |
| <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>                                            |                                                                                   | <b>103</b> |

# Lista de Figuras

|                                                                                                                                    |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 2.1: Diagrama de Fluxo da Implementação da norma ABNT NBR ISO 50001.....                                                    | 12 |
| Figura 2.2: Planejamento Energético segundo a norma ABNT NBR ISO 50001.....                                                        | 14 |
| Figura 2.3: Etapas do SGIE. Fonte: Avella et al., (2008). ....                                                                     | 17 |
| Figura 3.1: Funções básicas de uma <i>Smart <math>\mu</math>Grid</i> . Fonte: Moraes (2010).....                                   | 41 |
| Figura 3.2: Arquitetura geral de uma <i>Smart <math>\mu</math>Grid</i> . ....                                                      | 42 |
| Figura 3.3: Pirâmide de Área de Aplicação e Automatização. Fonte: Yorio (2008). ....                                               | 46 |
| Figura 3.4: Esquema Típico de Conexão para Redes Field-Host. Fonte: Aguirre (2007). ....                                           | 48 |
| Figura 3.5: Comparação de Redes Segundo Funcionalidade e Tipo de Buses. Fonte: Yorio (2008). ....                                  | 49 |
| Figura 3.6: Modelo de Referência OSI Para Protocolos de Comunicação. Fonte: Stallings (2004). ....                                 | 51 |
| Figura 3.7: Par Trançado Tipo UTP. ....                                                                                            | 55 |
| Figura 3.8: Par Trançado Tipo FTP. ....                                                                                            | 55 |
| Figura 3.9: Cabo Coaxial. ....                                                                                                     | 55 |
| Figura 3.10: Comparação das Tecnologias Sem Fio quanto à Velocidade e Alcance. Fonte: Stoll (2008). ....                           | 58 |
| Figura 3.11: Módulos XBee e XBee PRO com três opções de antena. ....                                                               | 60 |
| Figura 3.12: Adaptador/ conversor USB- XBee/Xbee PRO.....                                                                          | 60 |
| Figura 3.13: Exemplo de Aplicação Wi-Fi em uma <i>Smart micro Grid</i> .....                                                       | 62 |
| Figura 3.14: Medidores Inteligentes Para Monitorar Energia Elétrica. ....                                                          | 64 |
| Figura 3.15: Medidor Inteligente Para Monitorar Combustíveis Líquidos e Lubrificantes. ....                                        | 64 |
| Figura 3.16: Medidor Inteligente Para Monitorar Água. ....                                                                         | 65 |
| Figura 3.17: Medidor Inteligente Para Monitorar Gás. ....                                                                          | 65 |
| Figura 3.18: Dispositivo de Aquisição. ....                                                                                        | 67 |
| Figura 3.19: Relés inteligentes com capacidade de comunicação de dados. ....                                                       | 71 |
| Figura 3.20: Controladores de Automação Programável PACs. ....                                                                     | 71 |
| Figura 4.1: Parque Tecnológico Itaipu.....                                                                                         | 74 |
| Figura 4.2: Circuito Elétrico do Parque Tecnológico Itaipu.....                                                                    | 76 |
| Figura 4.3: Exemplo de Interconexões do Nível de Campo Para a <i>Smart <math>\mu</math>Grid</i> do Parque Tecnológico Itaipu. .... | 80 |

|                                                                                                                           |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 4.4: Interconexões do Nível de Controle Para a <i>Smart <math>\mu</math>Grid</i> do Parque Tecnológico Itaipu..... | 81 |
| Figura 4.5: Plataforma de Administração de Recursos Energéticos. ....                                                     | 82 |
| Figura 4.6: Modelo <i>Smart <math>\mu</math>Grid</i> para o Parque Tecnológico Itaipu. ....                               | 84 |
| Figura 4.7: Quadro Ethernet Powerlink. Fonte: Gonçalves (2010).....                                                       | 87 |
| Figura 4.8: Modelo Conceitual Smart Grid Proposto Pela Norma NIST. Fonte: .....                                           | 89 |
| Figura 4.9: Multimedidor UPD-200 instalado em um transformador do PTI.....                                                | 97 |
| Figura 4.10. Sistema para conversão, aquisição e processamento de dados junto com uma HMI. ....                           | 98 |

# Lista de tabelas

|                                                                                 |    |
|---------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 4.1: Distribuição de Energia Elétrica no PTI.....                        | 77 |
| Tabela 4.2 Formato de Quadro do Padrão IEEE 802.3. Fonte: Stallings (2004)..... | 86 |



# Lista de Símbolos

|         |                                                               |
|---------|---------------------------------------------------------------|
| A/D     | Conversor Analógico/Digital                                   |
| ABNT    | Associação Brasileira de Normas Técnicas                      |
| AMI     | <i>Advanced Metering Infrastructure</i>                       |
| CIGE    | Comissão Interna de Gestão da Energia                         |
| CLP     | Controlador Lógico Programável                                |
| CMOS    | <i>Complementary Metal-Oxide-Semiconductor</i>                |
| CPU     | <i>Central Processing Unit</i>                                |
| CRC     | <i>Cycle Redundancy Check</i>                                 |
| CSMA/CA | <i>Carrier sense multiple access with collision avoidance</i> |
| D/A     | Conversor Digital/ Analógico                                  |
| DDC     | <i>Direct Digital Control</i>                                 |
| DMS     | <i>Distribution Management System</i>                         |
| DSSS    | <i>Direct Sequencing Spread Spectrum</i>                      |
| EMCS    | <i>Energy Management Control System</i>                       |
| FAN     | <i>Field Area Network</i>                                     |
| FTP     | <i>Foiled Twisted Pair</i>                                    |
| GOOSE   | <i>Generic Object Oriented Substation Event</i>               |
| GPRS    | <i>General Packet Radio Service</i>                           |
| GPS     | <i>Global Positioning System</i>                              |
| GSE     | <i>Generic Substation Events</i>                              |
| GSSE    | <i>Generic Substation Status Event</i>                        |
| HMI     | Interfaces Homem- Máquina                                     |
| IEC     | <i>International Electrotechnical Commission</i>              |
| IED     | <i>Intelligent Electronic Device</i>                          |
| IEEE    | <i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>      |
| IP      | <i>Internet Protocol</i>                                      |

|       |                                                       |
|-------|-------------------------------------------------------|
| ISO   | <i>International Standards Organization</i>           |
| kVA   | Quilovolt-ampere                                      |
| kVAR  | Quilo Volt Ampère reativo                             |
| kW    | Quilo Watt                                            |
| LAN   | <i>Local Area Network</i>                             |
| MAC   | <i>Media Access Control</i>                           |
| NIST  | <i>National Institute of Standards and Technology</i> |
| OSI   | <i>International Standardization Organization</i>     |
| PAC   | Controladores de Automação Programáveis               |
| PCC   | Ponto de Conexão Comum                                |
| PLC   | <i>Power Line Communications</i>                      |
| PTI   | Parque Tecnológico Itaipu                             |
| REDs  | Recursos Energéticos Distribuídos                     |
| SCADA | <i>Supervisory Control And Data Acquisition</i>       |
| SCSM  | <i>Specific Communication Service Mapping</i>         |
| SGE   | Sistema de Gestão da Energia                          |
| SGIE  | Sistema de Gestão Integral da Energia                 |
| STC   | <i>Standard Test Conditions</i>                       |
| STP   | <i>Shielded Twisted Pair</i>                          |
| TCP   | <i>Transmission Control Protocol</i>                  |
| TMDA  | <i>Time Division Multiple Access</i>                  |
| TOU   | <i>Time-of-Use</i>                                    |
| TTL   | <i>Transistor-Transistor Logic</i>                    |
| UTP   | <i>Unshielded Twisted Pair</i>                        |
| UTR   | Unidade Terminal Remota                               |
| VI    | Instrumento Virtual                                   |
| Wp    | Watt de pico                                          |
| WPAN  | <i>Wireless Personal Area Network</i>                 |
| WWAN  | <i>Wireless Wide Area Network</i>                     |
| μ     | Micro                                                 |

# Capítulo 1

## Introdução

### 1.1 A Gestão Energética e a Microrrede Inteligente

O desenvolvimento atual e perspectivo da indústria e dos serviços, em uma economia aberta e globalizada como é a do Brasil, requer de ações direcionadas a reduzir custos e a aumentar a competitividade. Nesse sentido os recursos energéticos deixaram de ser um fator marginal e passaram a ser de extrema importância (Rocha e Monteiro, 2005; Avella et al., 2008; Roja, 2009; Oliveira, 2010; Keib e Hammons, 2009; Lieber, 2010).

Ao mesmo tempo, a necessidade de desenvolvimento sustentável está na agenda de muitas organizações que buscam um melhor equilíbrio entre as questões econômicas e a preservação do meio ambiente convertendo a gestão do uso eficiente e racional dos recursos, com destaque para a energia, em uma ferramenta fundamental para lograr esses objetivos (Bossel, 2006; Pimpinella et al., 2010; Avella et al., 2008; Roja, 2009; Wissner, 2011, Palvacino et al., 2011).

Nesse contexto, destaca-se a necessidade, por parte das organizações, de implementar um sistema de gestão integral de recursos energéticos, que permita fazer um uso mais eficiente da energia sem reduzir os níveis de produção e sem diminuir a qualidade de seus produtos e/ou serviços e, ainda, conseguir os objetivos citados de redução de custos, competitividade e proteção ambiental (Nordelo et al., 2005; Rocha e Monteiro, 2005; Turner e Doty, 2006).

Atendendo estas necessidades das organizações, recentemente, a ISO (*Internacional Standards Organization*) lançou sua norma 50001, prontamente editada pela ABNT NBR ISO 50001 (2011), para auxiliar às unidades consumidoras no desenvolvimento de seus modelos de gestão da energia. Esta norma consta de um conjunto de diretrizes e requisitos destinados a ajudar a todos os tipos de organizações, independentemente do seu tamanho e de suas condições geográficas, culturais ou sociais.

Também diversos autores têm proposto modelos para a gestão da energia, visando atender as necessidades de determinados segmentos de consumo e limitados no seu escopo (Rocha e Monteiro, 2005; Reis e Silveira, 2001; Nordelo et al., 2005; Kaehler, 2006; Turner e Doty, 2006; Avella et al., 2008).

Geralmente estes modelos atacam o problema do uso da energia sob dois aspectos fundamentais.

1. A eficiência com a qual a tecnologia de uso final transforma a energia nos serviços que contribuem diretamente para o bem-estar humano ou para a produção de bens e serviços;
2. A forma como essa energia é utilizada, quanto aos hábitos de uso e cultura de consumo.

O primeiro aspecto requer o contínuo acompanhamento das tecnologias de uso final com o fim de identificar equipamentos mais eficientes que possam substituir os existentes de forma viável. Também é necessário que seja feita a contínua supervisão dos equipamentos que estão sendo utilizados para verificar o seu real desempenho ao longo do tempo, considerando a degradação com o uso e, particularmente, o desempenho após a realização de procedimentos de manutenção.

O segundo aspecto é o mais complexo, pois depende do comportamento do ser humano. São as pessoas que devem controlar manualmente cada equipamento consumidor de energia e, portanto, são as pessoas que, com seus hábitos de consumo e seus comportamentos, decidirão a forma e quantidade de energia a ser consumida, não entanto, a tecnologia pode contribuir para a redução do tempo de uso dos equipamentos de uso final através de sistemas de supervisão e controle (Gellings et al., 2004; Navares, 2008; Sollecito, 2008; Choi et al., 2011).

É importante destacar que existe uma forte tendência, com o fim de aumentar a competição no mercado de energia elétrica, de que os consumidores deixem de ser passivos e tenham incentivos e meios de reagir ao preço, de forma tal a ter algum controle sobre o valor que estão pagando pela energia. Normalmente os consumidores finais pagam um preço que é uma média ao longo do tempo, sem importar o fato de que a transação ocorre no mesmo instante no atacado e no varejo, com o preço no atacado podendo flutuar muito no curto-prazo (Hunt, 2002; Kirschen, 2003; Villalva e Ramos, 2003; Brown e Salter, 2011; Wang et al., 2011).

O setor elétrico tentou racionalizar o uso da energia de várias formas, desde a sensibilização até a concessão de subsídios, exceto a que é utilizada em outros mercados, o preço. Racionalização por preços significa que os clientes irão reduzir a demanda quando o preço é elevado, que é justo quando o sistema mais precisa. Com este objetivo foi proposta pela ANEEL a criação da tarifa branca (Kamada e Boeira, 2011).

Espera-se que a resposta dos consumidores no mercado da eletricidade limite o aumento do preço, ao mesmo tempo em que incentiva o aumento da confiabilidade do sistema.

Dessa forma pode emergir um mercado de eletricidade aberto, permitindo o estabelecimento de mecanismos de reação da demanda aos preços variáveis no mercado. O agente que opera o sistema de distribuição deverá entender o comportamento do consumidor em tempo-real, antecipando suas necessidades e tomando decisões automáticas, quantificando a energia esperada, prevendo a demanda com exatidão e formulando a melhor alternativa de

atendimento, reduzindo o impacto da imprevisibilidade das fontes renováveis de energia, incluindo a inserção de veículos elétricos com seus ciclos de carga e descarga, e incorporando aspectos sociais nas suas decisões (Bajpai e Singh, 2004; Barria e Rudnick, 2007; Kulshrestha et al., 2009; Alfonso, 2010; Grenard et al., 2011).

Por outro lado, o consumidor deverá ser capaz de detectar as necessidades e as disponibilidades locais de energia, cobrindo-as em primeiro lugar e vendendo o restante no mercado. Deverá buscar o melhor balanço entre a oferta e a demanda local, de preferência em tempo-real, para evitar a imprevisibilidade do consumo e diminuir flutuações na curva de demanda.

O consumidor deve ter a habilidade de formular estratégias de consumo, de auto-produção de energia e de compra ou comercialização de possíveis excedentes, observando a evolução do seu processo produtivo e criando sinais a partir dos quais reagirá consumindo/produzindo mais ou menos (Brown e Salter, 2011).

A visão clássica de consumidores cativos, do ponto de vista das empresas distribuidoras de energia elétrica, é agora considerada de uma forma estendida, levando em conta a capacidade de geração local, integrando as funções de consumidor e produtor local para formar uma categoria mais geral, que em recentes trabalhos está sendo definida como *prosumer* (Pascalichio, 2011; Rathnayaka et al., 2011). Esta nova forma de considerar o consumidor é um dos elementos condutores da evolução das redes elétricas, que deve considerar o fluxo bidirecional de energia e de informação entre o consumidor e a empresa distribuidora/comercializadora (Subirachs et al., 2010; Gao et al., 2011; Jeon, 2011; Bouhafs et al., 2012).

Aliado ao anterior, o desenvolvimento tecnológico nas áreas de comunicação, computação, automação e dispositivos eletrônicos, com custos cada vez menores, vêm transformando a forma como é gerada, transmitida, distribuída e consumida a energia, criando a possibilidade de todo o sistema elétrico ser mais inteligente, o qual traz o termo *Smart Grid* (Rede Inteligente) ao vocabulário público (Falcão, 2010; Wang et al., 2011; Wissner, 2011). O que se busca de fato é que o sistema seja mais eficiente, confiável, flexível e otimizado, tanto em custos como em recursos. Além dos benefícios para o sistema elétrico a *Smart Grid* também contribui para a gestão e integração de diversos outros tipos de energia.

Porém, as tecnologias viabilizadoras evoluem rapidamente e estão sujeitas a ficarem obsoletas, ao qual deve ser somado o fato de que os fabricantes ainda tendem a fornecer produtos incompatíveis com os da concorrência, a fim de manter seus clientes cativos. Portanto, a aplicação dessas tecnologias requer um cuidadoso projeto que atenda as necessidades atuais, preveja as necessidades futuras e avalize a interoperabilidade tecnológica (Turner e Doty, 2006). Assim, a viabilização da *Smart Grid* requer trabalhos de pesquisa nos mais diversos setores do sistema elétrico (Falcão, 2010; Wang et al., 2011). Na geração surge a necessidade de desenvolver projetos de pesquisa em micro-geração distribuída e fontes alternativas de energia, incluindo a integração das mesmas na rede. Na transmissão é necessário realizar o monitoramento em tempo-real de ativos, com pesquisas

fundamentalmente orientadas para a utilização de técnicas avançadas de monitoramento em tempo-real do carregamento e condições de funcionamento de linhas de transmissão e transformadores. Na distribuição são necessárias pesquisas em sistemas de medição automática com capacidade de comunicação bidirecional, que permitam a leitura da demanda de consumidores individuais e transferência para um sistema centralizado de processamento de dados, conexão e desconexão de consumidores e disponibilização de informações do preço da energia em tempo-real. Também é necessário pesquisar a forma de realizar, de maneira dinâmica e automática, a reconfiguração do arranjo de conexões dos circuitos monofásicos ligados à rede de distribuição, efetuando a comutação suave destes circuitos de uma fase para outra, sem inserir harmônicos na rede elétrica ou provocar danos às cargas, a fim de evitar perdas entre fases do transformador e sobtensões (Gomes et al., 2010).

No que se refere ao uso final da energia é importante pesquisar como elementos armazenadores são capazes de armazenar energia nos horários fora de ponta para ser usada em horários de ponta, produzindo uma suavização da curva de demanda ao longo do dia; ou a aplicação de sistemas de gerenciamento de energia prediais, residenciais e industriais e o efeito da aplicação de técnicas de resposta da demanda (Kulshrestha et al., 2009; Bardo, 2010).

Segundo Falcão (2010), a transformação da rede de energia elétrica atual para a *Smart Grid* deverá acontecer de forma incremental: novas tecnologias de automação, computação e comunicações serão introduzidas em partes da rede elétrica, formando bolsões de sub-redes com as características da *Smart Grid*. Estes bolsões de sub-redes são denominados *Smart  $\mu$ Grid* (microrredes inteligentes) e consistem na aplicação de conceitos de *Smart Grid* a uma micro região (Palvacino et al., 2011).

A *Smart  $\mu$ Grid* deve ser entendida mais como um conceito do que uma tecnologia ou equipamento específico, não é possível abrir um catalogo comercial e comprar uma *Smart  $\mu$ Grid*, porém é possível reunir tecnologias e construir uma para atender determinadas necessidades.

O novo paradigma que se apresenta para as redes elétricas impõe a necessidade de melhorias na infraestrutura com enormes investimentos, sendo necessário criar uma grande massa de mão de obra qualificada para as mais diversas áreas de atuação, incluindo a fabricação de medidores inteligentes, instaladores de equipamentos, desenvolvedores de sistemas supervisórios, especialistas em gestão energética, microrredes, comunicação e cibersegurança, administradores de bases de dados e analistas de negócios e de sistemas de potência, dentre outras especialidades (Gordon e Shahidehpour, 2011). Ao mesmo tempo, os mesmos autores destacam que foi identificado um crítico déficit de programas de treinamento e educação para trabalhadores que deverão conduzir os rumos da *Smart Grid*.

## 1.2 Motivação

Além da visão global, referente à necessidade por parte das organizações de realizar a gestão integrada da energia e do crescente interesse pelas microrredes inteligentes no sistema elétrico, o qual foi descrito na seção anterior, o grande motivador do presente trabalho teve origem na necessidade do PTI realizar estudos sobre o comportamento da demanda nas suas instalações. Para tanto foi iniciado o processo de instalação de um sistema de monitoramento em tempo-real, para, com base nas informações obtidas, tomar decisões que aumentem o desempenho energético, implementando ações de controle automático da microrrede que alimenta as diversas cargas e na qual existem alguns recursos energéticos distribuídos. Sendo assim, é necessário pensar em métodos que permitam fazer um aproveitamento adequado e combinado destes recursos.

Outra questão motivadora é o fato de que o PTI tem sofrido alguns cortes no fornecimento de energia elétrica devido a falhas na microrrede do parque, sendo difícil ou impossível identificar as causas e localização dos eventos, demorando a restauração do serviço. Assim, a necessidade de aumentar a confiabilidade das instalações é de auxiliar à equipe de manutenção, criou a oportunidade de definir uma arquitetura física e lógica que permitisse a supervisão e controle em tempo real da microrrede do PTI.

Outro fato motivador do presente trabalho foi a possibilidade de poder contar com um laboratório vivo, que permitisse a capacitação de mão de obra nos conceitos de *Smart Grid* e a avaliação de desempenho de diversas tecnologias desenvolvidas como soluções para esse novo universo que representa a *Smart Grid*.

Visando atender todos estes requisitos, medição e controle inteligente, gestão integrada de recursos, restauração automática de faltas e capacitação de pessoal nos conceitos de *Smart Grid* é que surge a proposta deste trabalho, cujos objetivos serão apresentados a seguir, após uma breve revisão da literatura.

## 1.3 Revisão Bibliográfica

Diversos trabalhos propuseram o uso de tecnologias construindo arquiteturas para fazer a gestão de determinadas tarefas pontuais, referentes ao uso final da energia em uma unidade consumidora.

Suárez et al. (2010) desenvolveram uma rede *wireless* com o objetivo de controlar o fator de potência de cargas indutivas. Nazaré et al. (2009) propuseram a utilização de um *software* de instrumentação virtual com objetivo de realizar o monitoramento e controle da qualidade de energia. No trabalho de Wang et al. (2010) é apresentado um sistema para monitoramento de sobretensão em uma rede de distribuição.

O trabalho de Bardo (2010) mostra uma técnica de resposta à demanda mediante a utilização de dispositivos armazenadores de energia. Kulshrestha et al. (2009) desenvolveram

uma plataforma aplicada a praças de estacionamento municipais para integrar veículos elétricos com a rede elétrica pública, pretendendo desta maneira suavizar a curva de demanda de energia elétrica ao longo do dia.

Wesley (2011) propôs um sistema inteligente para alocação eficiente de dispositivos indicadores de falta em alimentadores de distribuição.

Porém, estes trabalhos estão focados em aspectos pontuais, sem considerar a possibilidade de desenvolver uma arquitetura tipo *Smart  $\mu$ Grid* capaz de realizar estes e diversos outros projetos de forma integrada.

Outros trabalhos desenvolveram redes de aquisição de dados focados à energia elétrica, sem considerar a integração de outros recursos energéticos. O monitoramento é realizado de forma automática, porém as ações de controle são realizadas de forma manual, mediante mudanças em hábitos e processos. Trata-se, portanto, de um controle limitado às capacidades humanas, incapaz de atender determinadas tarefas repetitivas e que demandam atuação em tempo real. Alguns desses trabalhos são descritos brevemente a seguir.

Melo et al. (2010) propuseram uma arquitetura de monitoramento do sistema de energia elétrica através da utilização de medidores inteligentes e *software* de monitoramento comunicado mediante tecnologias GPRS.

Murillo e Fonseca (2009) integraram uma rede LAN (*Local Area Network*) de tecnologia PLC (*Power Line Communications*) a uma rede metropolitana de fibra óptica, visando realizar o monitoramento de subestações de energia elétrica.

Carvajal e Pérez (2008) implementaram uma rede aquisição de dados de consumo e qualidade de energia elétrica mediante o uso de medidores inteligentes e uma rede de par trançado trabalhando em conjunto com rede *wireless* e Lima (2010) mostra uma rede *wireless* a fim de fazer monitoramento do consumo de água.

Já outros trabalhos desenvolveram arquiteturas para atender um maior número de necessidades vinculadas à gestão integrada da energia, sendo alguns deles descritos a seguir.

Lozano et al. (2000) propuseram uma arquitetura de controle distribuído com o intuito de realizar monitoramento e controle de diversas variáveis que participam no aproveitamento energético das instalações de uma determinada unidade consumidora com foco na integração de geração distribuída. Porém, os sistemas de controle distribuído tendem a se tornar complexos, com um grande número de variáveis, ações e inter-travamentos, limitando o número de conexões de dispositivos de entrada e saída. O conceito de redes de automação industrial (*Fielbus*), por sua vez, permite dividir o problema em partes menores e assim atender um maior número de requisitos que aqueles atendidos por um sistema de controle distribuído.

Rocha (2008) apresentam uma arquitetura capaz de monitorar e controlar de forma integrada a demanda, consumo e fator de potência em uma unidade consumidora, porém sem considerar outras estratégias de gestão da energia como, por exemplo, suavização da curva de

demanda por meio da utilização de dispositivos armazenadores e integração da rede elétrica com veículos elétricos. Portanto, está focado unicamente no gerenciamento de energia elétrica sem considerar a gestão integrada de diversos recursos energéticos.

Han e Lim (2010) mostram uma rede residencial baseada na utilização de tecnologia sem fio para gerenciar a energia elétrica, porém esta rede *wireless* é de curto alcance, pensada para uma unidade consumidora de pequeno porte, com um único prédio, sendo necessário estudar a sua extensão e sua viabilidade para uma unidade de grande porte, incluindo a questão de proteção de subestações.

## 1.4 Proposta do Trabalho

Dado o contexto anterior, o presente trabalho pode ser considerado como sendo multi-foco. Primeiro foram analisadas de forma crítica as estruturas, esquemas e modelos para a gestão energética de uma unidade consumidora de energia, com o objetivo de estabelecer um modelo que permita implantar um Sistema de Gestão Integrada da Energia (SGIE), elucidando cada etapa a ser considerada com vistas ao atendimento à Norma ABNT NBR ISO 50001. A gestão deve considerar as estratégias de supervisão e controle das opções de uso de energia como também as possibilidades de oferta local e de comercialização de qualquer excedente. O segundo foco do trabalho está centrado no objetivo de propor uma arquitetura física e lógica de um sistema que, integrado com os aplicativos adequados que deverão ser desenvolvidos, permitirá fazer a gestão integrada da energia em tempo-real. Através da arquitetura proposta deverá ser possível realizar, inclusive, transações em tempo-real caso essa alternativa vier a ser possível.

O principal objetivo, em longo prazo, da proposta apresentada no trabalho é poder contar com um laboratório vivo para a formação, treinamento e capacitação de mão de obra com elevada qualificação, de vital importância para desenvolver e manter uma microrrede inteligente (*Smart  $\mu$ Grid*), sendo este um desafio mundial para a evolução da infraestrutura energética fundamentada na eficiência, sustentabilidade e redução do impacto ao meio ambiente.

O SGIE está pensado com vistas a sua implementação nas instalações do Parque Tecnológico Itaipu (PTI), o qual conta com mais de 50.000 metros quadrados de área construída, distribuídos em vários blocos. O Parque possui diversos centros de carga interligados através de uma microrrede elétrica e pode, portanto, ser considerado como uma unidade consumidora de grande porte, que ainda conta com a possibilidade de gerar parte da energia consumida através de geradores distribuídos.

Assim, o trabalho propõe um SGIE, que deverá contar com um sistema de supervisão e controle em tempo-real e as tecnologias associadas, conformando uma plataforma com características tipo *Smart  $\mu$ Grid* para o PTI, porém visando dispor de um laboratório vivo

priorizando uma arquitetura com a integração de várias tecnologias, ainda que isso implique em um sistema de custos maiores e sacrifique o projeto de uma arquitetura otimizada.

Complementando a arquitetura física e lógica, será necessário o desenvolvimento de aplicativos que permitirão a execução de diferentes funções, como medição e registro de dados de fluxo de energia, monitoramento dos REDs (Recursos Energéticos Distribuídos) em tempo real, controle da carga para atender determinadas estratégias de contratação com a concessionária local, mapeamento das leituras em tempo real e dos dados históricos com o fim de identificar tendências, detecção e emissão de relatórios de eventos e tratamento de alarmes. Deve ser destacado que a definição destes aplicativos não faz parte do escopo do trabalho.

## 1.5 Estrutura do Trabalho

O presente trabalho está dividido em cinco capítulos.

O segundo capítulo apresenta a norma ISO 50001 e propõem um SGIE pensado para ser implementado nas instalações do Parque Tecnológico Itaipu. Também são abordados os requisitos dos sistemas de controle orientados à gestão da energia.

O terceiro capítulo relata as características técnicas da microrrede e suas necessidades de contar com tecnologias de automação e controle para gerenciar integralmente seus REDs. Também são apresentados os conceitos de *Smart Grid* e a aplicação de suas filosofias sobre uma microrrede transformando-a em uma *Smart  $\mu$ Grid*.

O quarto capítulo propõe uma arquitetura tipo *Smart  $\mu$ Grid* para o Parque Tecnológico Itaipu visando atender determinadas etapas do SGIE e ainda funcionar como um laboratório vivo.

Finalmente, o capítulo cinco sintetiza as principais conclusões e contribuições do estudo.

# Capítulo 2

## Gestão Integrada da Energia

Para assegurar o uso eficiente e racional da energia nos processos produtivos, com a aspiração de aumentar a competitividade empresarial e atender às normas de proteção ambiental, as organizações necessitam um sistema de gestão energética, inserido na estrutura organizacional, independente do seu nível de desenvolvimento e do seu tamanho, mas que produza resultados significativos e, fundamentalmente, perduráveis (Rocha e Monteiro, 2005; Kaehler, 2006; Turner e Doty, 2006; Avella et al., 2008).

Este capítulo trata das estratégias e as etapas que devem ser seguidas para a implementação de um Sistema de Gestão Integrada da Energia (SGIE), caracterizado por um conjunto estruturado e normatizado de processos, procedimentos e atividades, realizadas de forma organizada e sistematizada, que está inserido e faz parte do sistema organizacional da unidade energética considerada e que permite a materialização de políticas, objetivos e metas na permanente busca pela maximização no aproveitamento dos recursos energéticos, seja no consumo ou na produção.

A implementação de um SGIE é um processo contínuo do aperfeiçoamento de hábitos e tecnologias, atuando tanto do lado da demanda de energia quanto do lado da oferta (Nordelo et al., 2005). Do lado da demanda devem ser considerados os dois aspectos anteriormente citados: atuação sobre hábitos e processos e, escolha de tecnologias mais eficientes (Rocha e Monteiro, 2005; Kaehler, 2006; Turner e Doty, 2006; Avella et al., 2008). Na oferta de energia devem ser considerados os recursos disponíveis localmente, e que podem ser utilizados para atender parte ou toda a demanda de energia, e a definição de estratégias para a compra e possível venda de excedentes (Brown e Salter, 2011).

Com base nas necessidades anteriormente citadas, várias empresas implantaram seus próprios modelos de gestão energética com elevado grau de espontaneidade haja vista que não existia nenhuma norma internacional que servisse de guia para o desenho organizacional requerido para a administração eficiente dos recursos energéticos. Esta deficiência foi atendida pela recentemente lançada Norma ABNT NBR ISO 50001, que busca contribuir com a necessidade mundial de reduzir as emissões de gases de efeito estufa e de frear o crescente custo da energia, além de auxiliar as unidades consumidoras na elaboração de seus modelos de gestão da energia. Assim, essa Norma será descrita no presente capítulo, servindo de guia para o modelo de SGIE proposto neste trabalho, sistema este adaptado de modelos encontrados na literatura pesquisada.

## **2.1 A Gestão Energética como Cultura Organizacional**

As unidades consumidoras geralmente geram produtos e/ou serviços e também resíduos, através do processo produtivo que requer de vários recursos como capital, tecnologia, matéria prima, energia e recursos humanos. Com a finalidade de incrementar a competitividade empresarial as unidades consumidoras buscam aumentar a sua produção e diminuir a utilização de recursos, dois paradigmas aparentemente opostos, mas possíveis mediante a implementação de programas de gestão de recursos (Avella et al., 2008).

Através da gestão é possível aumentar a produção em qualidade e quantidade ao mesmo tempo em que se reduz o investimento de recursos, tornando possível produzir mais com menos (Kaehler, 2006; Avella et al., 2008). A gestão possibilita aumentar lucros, produtividade, qualidade do produto, participação no mercado, satisfação dos clientes e reduzir custos, sempre atendendo aos requisitos legais existentes (Turner e Doty, 2006).

Em particular, a gestão da energia requer também de gestão de recursos humanos mediante programas de treinamento e conscientização do pessoal, gestão da matéria prima mediante reaproveitamento de resíduos, gestão de tecnologias mediante a incorporação de equipamentos mais eficientes e gestão do capital mediante investimentos que auxiliem a eficiência energética. Em outras palavras, a gestão da energia impacta em toda a cultura organizacional (Rocha e Monteiro, 2005; Kaehler, 2006; Avella et al., 2008), mostrando a importância da sistematização e normatização de procedimentos para a sua efetiva implementação.

## **2.2 A Norma ABNT NBR ISO 50001**

A ABNT NBR ISO 50001, também conhecida como a Norma Internacional de Gestão da Energia, é um conjunto de diretrizes e requisitos destinados a ajudar a todos os tipos de organizações na implementação de programas de gestão energética, independentemente do seu tamanho e de suas condições geográficas, culturais ou sociais. Espera-se que a implementação desta norma auxilie no estabelecimento de sistemas e processos que conduzam a uma melhoria do desempenho energético da organização, através de uma gestão sistemática da energia (Piñero, 2009).

A aplicação da Norma pode ser ajustada para atender os requisitos específicos da organização, os quais determinarão a complexidade do sistema, o grau de documentação e o montante de recursos.

A ABNT NBR ISO 50001 não estabelece critérios específicos de desempenho energético para o SGIE e foi elaborada para ser usada de forma independente, embora possa alinhar-se ou integrar-se a outros sistemas de gestão, o qual é desejável, pois se espera que faça parte da cultura organizacional.

A Norma é baseada na estrutura de melhoria contínua *Plan-Do-Check-Act* (Planejar-Fazer-Verificar-Agir), conforme mostrado na Figura 2.1, e busca que a gestão da energia esteja inserida em todas as práticas diárias da organização.

**Planejar:** Realizar a caracterização energética da organização e estabelecer uma referência quantitativa utilizada como base de comparação para acompanhar o desempenho energético ao longo do tempo. Essa referência é chamada *Linha de Base* e constitui o ponto de partida para as melhorias, sendo a linha a partir da qual todas as mudanças no desempenho da energia deverão ser medidas. Ao planejar também são fixados os objetivos, metas e planos de ação, necessários para obter os resultados que levarão à melhoria do desempenho energético, em conformidade com a política energética da organização. Para verificar o cumprimento dos objetivos e metas, devem ser estabelecidos os indicadores de desempenho, os quais auxiliam na identificação de fortalezas e debilidades do SGIE implementado. Um indicador pode ser um simples parâmetro ou um modelo complexo, e deverá ser revisto e comparado à Linha de Base em intervalos de tempo regulares (Yanes e Gaitan, 2005).

**Fazer:** Implementar os planos de ação de gestão da energia.

**Verificar:** Monitorar e medir os processos, identificar as principais características das ações que irão influenciar no desempenho energético em relação à política e objetivos energéticos, e comunicar os resultados.

**Agir:** Executar ações para garantir a melhora contínua do desempenho energético e do SGIE implementado. A atuação pode estar formada por ações corretivas e ações preventivas. A ação corretiva é uma ação para eliminar a causa de uma não-conformidade detectada, podendo existir mais de uma causa para uma não-conformidade. As ações corretivas são executadas para prevenir a recorrência enquanto que uma ação preventiva é executada para prevenir a ocorrência.

### 2.2.1 Requisitos Gerais do Sistema de Gestão da Energia

Alguns requisitos gerais devem ser atendidos por parte da organização ao buscar a certificação na ABNT NBR ISO 50001, sendo eles:

- Estabelecer, documentar, implementar, manter e melhorar um Sistema de Gestão da Energia - SGE;
- Definir e documentar o escopo desse SGE;
- Determinar como serão atendidos os requisitos da norma, visando atingir a melhoria contínua do seu desempenho energético e do SGE.

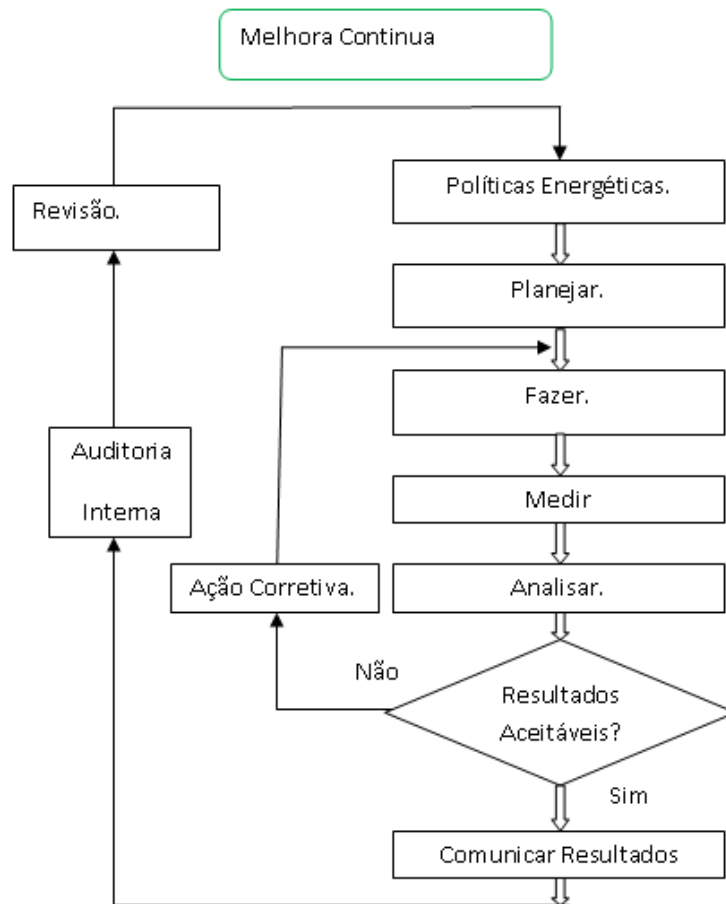


Figura 2.1: Diagrama de Fluxo da Implementação da norma ABNT NBR ISO 50001.

Para que esses requisitos gerais sejam atendidos, a norma estabelece um conjunto de outros requisitos específicos, sendo alguns deles descritos a seguir.

### 2.2.2 Responsabilidade da Direção

A alta direção da organização deve estar comprometida com a instalação do SGE. Esse comprometimento é formalizado ao viabilizar e aprovar a formação de uma equipe que constituirá a Comissão Interna de Gestão da Energia – CIGE, a qual operacionalizará as ações de gestão energética. A direção deve contribuir com a melhoria contínua e a efetividade do SGE através da:

- Definição, implementação e manutenção de uma política energética;
- Fornecimento de recursos humanos, habilidades especializadas, tecnologias e recursos financeiros necessários para estabelecer, implementar, manter e melhorar o SGE e o desempenho energético resultante;
- Garantia de que os indicadores de gestão sejam apropriados;
- Consideração do desempenho energético no planejamento de longo prazo;

- Garantia de que os resultados sejam medidos e comunicados em intervalos determinados.

### **2.2.3 Política Energética**

A política energética, definida pela direção, deve declarar o comprometimento da organização em busca da melhoria contínua do desempenho energético, sendo importante garantir que a mesma:

- Seja apropriada à natureza e escala do uso e consumo de energia;
- Mostre o comprometimento com a melhoria contínua do desempenho energético;
- Inclua um comprometimento para garantir a disponibilidade de informações e de recursos necessários para atingir objetivos e metas;
- Apóie a aquisição de produtos e serviços energeticamente eficientes e projetos para a melhoria do desempenho energético;
- Seja documentada e comunicada em todos os níveis e regularmente revisada e atualizada quando necessário.

### **2.2.4 Planejamento Energético**

Segundo estabelece a norma, deve ser conduzido e documentado um processo de planejamento energético que seja consistente com as políticas energéticas e que defina atividades que melhorem continuamente o desempenho energético. Na Figura 2.2 é ilustrado o procedimento de planejamento proposto pela norma.

Várias ações fazem parte do processo de planejamento, sendo algumas delas descritas brevemente a seguir.

### **Revisão Energética**

Para desenvolver a revisão energética a organização deve:

- Analisar o uso e consumo de energia com base em medições e outros dados. Isto é, identificar as fontes de energia atuais e avaliar o uso e consumo de energia atual e passado;
- Com base na análise do uso e consumo de energia, identificar as áreas de uso significativo de energia;
- Identificar, priorizar e registrar oportunidades de melhoria de desempenho energético.



Figura 2.2: Planejamento Energético segundo a norma ABNT NBR ISO 50001.

A identificação de oportunidades de melhoria da eficiência energética inclui identificação de fontes potenciais de energia disponíveis localmente, como fontes convencionais que não foram previamente usadas pela organização e fontes alternativas de energia, seja com combustíveis fósseis ou não-fósseis.

A revisão energética deve ser atualizada em intervalos definidos, bem como em resposta a mudanças expressivas em instalações, equipamentos, sistemas ou processos.

Com as informações disponibilizadas pela revisão energética, a organização deve estabelecer e manter registros de linhas de base energética, e as mudanças promovidas pelas ações de melhoria devem ser comparadas com essas linhas de base.

Os ajustes nas linhas de base devem ocorrer quando os Indicadores de Desempenho Energético (IDEs) não refletirem mais a realidade energética da organização, ou quando houver mudanças significativas em processos ou padrões de operação ou em sistemas de energia.

## Objetivos Energéticos, Metas Energéticas e Planos de Ação

A organização deve estabelecer, implementar e manter documentados os objetivos e metas energéticas para as relevantes funções, níveis, processos e instalações dentro da organização. Os objetivos e as metas devem ser consistentes com a política energética.

Quando do estabelecimento e revisão de objetivos e metas, a organização deve considerar o uso significativo de energia e oportunidades de melhoria do desempenho energético, conforme identificadas na revisão energética. Também deve considerar suas condições financeiras, operacionais e comerciais, suas opções tecnológicas e as visões das partes interessadas. A organização deve estabelecer, implementar, manter e atualizar planos de ação para o cumprimento dos objetivos e metas, os quais devem incluir:

- Atribuição de responsabilidades;
- Meios e cronogramas através dos quais as metas individuais serão atingidas;
- Método pelo qual uma melhoria de desempenho energético será verificada;
- Método para verificação de resultados.

### **2.2.5 Implementação e Operação**

A organização deve utilizar os planos de ação e outros resultados oriundos do processo de planejamento para a implementação e operação de:

- Treinamento e conscientização do pessoal;
- Comunicação de resultados atingidos;
- Formação de uma documentação de procedimentos e resultados;
- Controle operacional;
- Procedimentos para a compra de energia, produtos e equipamentos.

Dentre as etapas anteriores deve ser destacada a importância de estabelecer, implementar e manter informações em papel, meio eletrônico ou qualquer outro meio para descrever os elementos-chave do SGE e suas interações. Essa documentação deve incluir, no mínimo:

- O escopo e as fronteiras do SGE;
- A política energética;
- Os objetivos e metas energéticas e planos de ação.

### **2.2.6 Verificação**

A etapa de verificação garante a melhoria contínua do SGE e devem ser considerados, dentre outros, os seguintes assuntos:

- Monitoramento, medição e análise;
- Auditorias internas;
- Identificação de não conformidades e correção mediante ações corretivas e ações preventivas;
- Controle de registros.

De acordo com a norma, a organização deve garantir que as características-chave de suas operações que determinam o desempenho energético sejam monitoradas, medidas e analisadas em intervalos planejados. Essas características-chave devem incluir no mínimo:

- Usos significativos da energia e resultados da revisão energética;
- Variáveis relevantes relativas ao uso significativo de energia;
- Indicadores de gestão;
- Efetividade dos planos de ação para o cumprimento de objetivos e metas; e
- Avaliação do consumo energético real em relação ao esperado.

Assim, deverá ser efetivado um plano de medição apropriado ao tamanho e complexidade da unidade consumidora e aos seus equipamentos de medição e monitoramento. As medições podem variar de um simples medidor a completos sistemas de análise automática, sendo isto parte do escopo do presente trabalho.

Deve-se estabelecer e manter os registros para demonstrar a conformidade com os requisitos do SGE, à norma e aos resultados de desempenho energético alcançados.

Os registros devem permanecer legíveis, identificáveis e rastreáveis e deve-se definir e implementar controles para identificação, acesso e retenção de registros.

### **2.2.7 Revisão da Alta Direção**

Em intervalos planejados a organização deve analisar criticamente o SGE para assegurar sua continuada pertinência, adequação e efetividade, emitindo decisões e ações relativas a alterações:

- No desempenho energético;
- Na Política Energética;
- Nos indicadores de gestão;
- Nos objetivos, metas ou em outros elementos do SGE, consistentes com o comprometimento da organização para a melhoria contínua;
- Na alocação de recursos.

## **2.3 Sistema de Gestão Integrada da Energia**

A seguir, considerando a norma ABNT NBR ISO 50001, o modelo proposto pela Universidad del Atlántico e pela Universidad Autónoma del Occidente (Avella et al., 2008), o guia técnico de gestão energética do PROCEL (Rocha e Monteiro, 2005), o livro de Turner e Doty (2006) e as ferramentas de gestão propostas por Yanes e Gaitan (2005), será descrito um SGIE que poderia ser ambientado nas instalações do Parque Tecnológico Itaipu.

O processo de implementação do SGIE pode ser comparado com subir uma escada em espiral (Figura 2.3), na qual cada degrau representa uma atividade a ser desempenhada e, assim, a implementação do SGIE se torna uma ascensão ilimitada, que representa a melhoria contínua recomendada pela norma anteriormente descrita.

Basicamente, a implementação do SGIE está sustentada em três grandes etapas que garantem a aquisição da cultura, a tecnologia e o nível organizacional requerido para que a gestão energética seja integrada e contínua no tempo. Essas macroetapas são:

- Decisão Estratégica;
- Instalação;
- Operação.

### 2.3.1 Decisão Estratégica

Essa primeira etapa abrange um conjunto de atividades que são necessárias devido ao fato de que geralmente as unidades consumidoras não estão preparadas cultural, técnica e organizacionalmente para começar a instalação e operação de um SGIE e necessitam de algumas atividades preparatórias que são realizadas uma única vez.

Nesta etapa, identifica-se o estado atual da organização, suas metas, seus impactos ambientais seus custos de operação e as vantagens que trará a implementação do SGIE.



Figura 2.3: Etapas do SGIE. Fonte: Avella et al., (2008).

Algumas das atividades que devem ser realizadas são:

- Concepção de uma Comissão Interna para a Gestão da Energia – CIGE;
- Caracterização Energética da organização;
- Compromisso da alta direção;
- Estabelecimento de Políticas Energéticas;
- Alinhamento das estratégias.

### **A Comissão Interna para a Gestão da Energia**

Inicialmente deve ser criada e implantada uma CIGE que tem como principal função a coordenação do SGIE implementado e deverá estar diretamente vinculada à direção da organização. A CIGE terá um coordenador designado pela direção da organização e preferencialmente deverá ser um engenheiro com conhecimentos do uso racional da energia.

A CIGE deverá ter um plano de trabalho com a descrição de objetivos, metas e cronogramas. Algumas de suas atribuições são:

- Garantir o estabelecimento, implementação e manutenção do SGIE;
- Realizar e controlar um diagnóstico energético;
- Controlar e acompanhar o faturamento da energia e, no caso da energia elétrica, controlar o consumo, a demanda e os fatores de carga e de potência;
- Avaliar os dados levantados, analisar o cumprimento das metas e discutir as situações de desperdício energético;
- Propor medidas corretivas de gestão de energia a partir do diagnóstico e análise dos custos;
- Inspeccionar periodicamente as instalações identificando possíveis melhoras e pontos de desperdício de energia;
- Identificar pessoal de outras áreas para integrar-se à CIGE e trazer novas ideias.

### **Caracterização Energética da Unidade Consumidora**

Para poder desenvolver um adequado planejamento energético é necessário fazer um estudo inicial da organização para identificar o estado energético atual e a forma de administração e uso da energia. Identifica-se o potencial de redução de custos mediante o planejamento da produção e a melhoria da capacidade técnica-organizativa para administrar a energia de forma eficiente.

Identifica-se também a capacidade de desenvolver inovações que auxiliem a melhoria do desempenho energético e as condições para desenvolver estratégias de vigilância tecnológica e inteligência competitiva.

Para realizar a caracterização energética devem ser realizadas as seguintes ações:

- Análise da distribuição de energia primária e secundária na organização;
- Desenvolver um fluxograma do processo produtivo, adicionando todas as entradas e saídas de materiais (incluindo resíduos) e de energia, com suas magnitudes características para os níveis de produção da unidade consumidora, exibindo os níveis de produção de cada etapa e entradas externas ao processo. É conveniente expressar as magnitudes da energia consumida em cada etapa do fluxograma por tipo de energético e em porcentagens em relação ao consumo de cada tipo. O Diagrama Energético Produtivo exhibe em que áreas e processos encontram-se as rejeições de materiais e os efluentes energéticos não utilizados. Identificam-se os possíveis centros de custos energéticos e as áreas e os equipamentos chaves da unidade consumidora;
- Construir diagramas de correlação de energia consumida em função da produção. Este gráfico pode ser construído por tipo de portador energético e por área, considerando em cada caso a produção associada ao portador em questão. Este gráfico determina em que medida as variações dos consumos energéticos são devidas a variações na produção e também determina se os componentes de um indicador de consumo de energia estão correlacionados entre si e, portanto, se o indicador é válido ou não;
- Elaborar um diagrama do índice de consumo em função da produção e gráficos de tendências.

Também podem ser formados níveis corporativos com outras unidades consumidoras que tenham implementado um bom programa de gestão de energia e aplicar as ideias no desenvolvimento do SGIE próprio.

### **Compromisso da alta direção**

Uma vez caracterizada a unidade consumidora, quanto ao uso e disponibilidade de recursos energéticos, apresenta-se o estado atual à alta direção e se estabelecem os compromissos de tarefas e de redução de custos energéticos. Determinam-se os requisitos necessários para implementar o SGIE e são formulados os compromissos gerais da direção durante a instalação e operação do SGIE.

### **Estabelecimento de Políticas Energéticas**

As políticas energéticas são as metas e intenções globais da organização em relação à eficiência energética, formalmente expressas pela alta direção. Devem estabelecer o comprometimento da mesma em atingir a melhoria do desempenho energético.

Segundo Turner e Doty (2006), uma política energética bem escrita oferece ao presidente da CIGE a possibilidade de estar envolvido no planejamento de negócios, seleção

de equipamentos de produção, compra de equipamentos de medição e treinamento de trabalhadores.

Para serem eficazes as políticas devem ser expressas de maneira sucinta, no máximo em duas páginas, haja vista que não constituem um manual de procedimentos. Devem ser básicas e atender ao seguinte:

- **Objetivas:** para adquirir novos equipamentos a ênfase será a análise de custos do ciclo de vida e não só o custo inicial;
- **Informativa:** para solicitar fundos para a gestão de energia é preciso informar a razão legítima de sua necessidade;
- **Integral:** deve incluir todas as áreas em que deverão ser treinados os trabalhadores e indicar os custos associados.

### **Alinhamento das estratégias**

Para mostrar a importância na política administrativa interna, o programa de gestão energética deve ser formalmente lançado como um marco na existência da organização, o qual deverá ocorrer por meio de um documento ou evento formal.

Para a implementação do SGIE a direção deve delegar responsabilidades ao grupo de funcionários encarregados de criá-lo e implementá-lo, mantendo-se comprometida com o sucesso e acompanhando as ações e resultados.

Assim, decidida a importância estratégica do SGIE, seu lançamento deverá abranger, no mínimo, sua institucionalização no organograma da organização, suas diretrizes e os responsáveis por sua condução.

A alta direção apresenta para todos os setores as políticas energéticas, com prazos, resultados esperados e métodos de trabalho a serem utilizados, cobrando participação, responsabilidades e compromissos de todo o pessoal, sejam ou não integrantes da CIGE.

### **2.3.2 Instalação do SGIE**

Uma vez decidida e realizada a etapa de decisão estratégica é o momento de começar a instalação do SGIE na organização. As atividades a serem executadas são as apresentadas a seguir.

#### **Estabelecimento dos indicadores de gestão**

Esta atividade consiste em caracterizar cada centro de custo energético mediante gráficos de correlação, identificação de metas e gráficos de controle do índice de consumo, determinação da produção crítica, gráficos de tendências, gráfico de Pareto que identifica os 20% das causas que provocam 80% das perdas e avaliação de orçamentos. É definida a linha de base de gestão da energia e periodicamente comparam-se os resultados obtidos.

Os índices de consumo podem ser obtidos de forma automática, contando com o apoio da tecnologia de informação e comunicação, combinando dados de energia com dados de produção empresarial.

### **Identificação das variáveis de controle por centros de custos**

Identificam-se eventos e variáveis que influenciam no consumo energético de cada centro de custo o em seus processos. Devem ser realizados encontros com os trabalhadores de cada jornada de trabalho para desenvolver mapas do processo produtivo, identificar e validar as variáveis de controle e estimular os mesmos a gerar idéias e projetos de inovação que contribuam para a melhoria do desempenho energético, aproveitando da melhor maneira possível as experiências do recurso humano da organização.

### **Planejamento de ações**

Nesta atividade está prevista a identificação e valoração técnica, econômica, ambiental e financeira das medidas a curto, médio e longo prazo. Classificam-se as medidas com e sem mudanças tecnológicas, segundo o critério de rentabilidade utilizado pela organização, pelo investimento inicial necessário e pelo tempo de execução.

As metas de redução do consumo serão definidas com base nos parâmetros de controle previamente identificados e sempre deverão ser alcançáveis e desafiadoras. A definição das metas pode ser feita:

- Utilizando informações sobre o consumo histórico do centro de consumo em questão;
- Utilizando informações sobre benchmarks disponíveis;
- De forma arbitrária, fixando um percentual a ser atingido em determinado período de tempo (por exemplo: Redução no consumo de energia elétrica em 1% para o próximo semestre).

Elaboram-se projetos associados aos objetivos, definem-se as atividades de manutenção, produção, operação, venda, compra, gestão tecnológica, inovação, segurança e meio ambiente.

### **Vigilância tecnológica e inteligência competitiva**

Conformam-se redes de conhecimento formadas por especialistas, grupos de pesquisa e centros de desenvolvimento, dentre outros atores, com capacidade de analisar o entorno e projetar cenários futuros. Dessa forma é possível fortalecer capacidades e competências na vigilância tecnológica, de forma tal a tomar decisões estratégicas que proporcionem desenvolvimento, inovação e incorporação de tecnologias eficientes e mudanças nos processos.

## Diagnóstico energético

Consiste em fazer um levantamento, o mais detalhado possível, de toda a organização, identificando todos os equipamentos de cada centro de consumo, registrando seu estado técnico, sua eficiência energética, seu consumo nominal, dentre outros parâmetros que se considerem necessários. Também são identificadas as oportunidades, as medidas e os projetos para reduzir custos energéticos nos equipamentos e nos processos chave, considerando:

- Áreas e equipamentos a serem diagnosticados;
- Regimes típicos de trabalho;
- Laços de controle e automação;
- Planejamento da produção;
- Oportunidades em instrumentação, automação e controle;
- Efluentes Energéticos.

## Definição do Sistema de Medição e Monitoramento

Em cada centro de custo se estabelece um sistema de monitoramento do processo. Esse sistema está constituído por uma estrutura física e lógica, com equipamentos de medição, rede e protocolo de comunicação e software de supervisão. Deve estar claro quais são as variáveis e indicadores a monitorar, tempos e intervalos de monitoramento, gráficos e forma de apresentação dos resultados, responsável pelo monitoramento e equipe de implementação de melhorias. Também se estabelecem os métodos de análise dos resultados e as ações corretivas e preventivas requeridas, assim como também as tecnologias de monitoramento que permitam a obtenção da base de dados desejada e que possa servir para avaliar os resultados alcançados.

Esta atividade é fundamental para poder fazer uma adequada gestão e requer de longos períodos de planejamento, a fim de superar barreiras tecnológicas, como a interoperabilidade, e barreiras políticas relacionadas à comercialização de energia.

## Definição do Sistema de Atuação e Controle

Para poder gerenciar adequadamente os recursos energéticos é necessário realizar atuações sobre a forma como a energia é gerada, transformada e utilizada na unidade consumidora. O crescente desenvolvimento da Tecnologia da Informação, Comunicação e Automação, juntamente com o poder e a massificação dos computadores pessoais, têm fornecido grandes avanços nos SGIE, viabilizando o que hoje são chamados de Sistemas de Controle para a Gestão da Energia (EMCS<sup>1</sup>), que utilizam e atuam sobre uma ampla base de variáveis, através de controladores lógicos programáveis, para melhorar o uso da energia.

## Treinamento do pessoal

A organização deve identificar o pessoal chave para implantar o SGIE, definindo requisitos de competência e preparando um plano de treinamento e conscientização baseados

---

<sup>1</sup> Do inglês *Energy Management Control System*

nesses requisitos. A competência baseia-se na combinação relevante de educação, treinamento, habilidades e experiências.

O programa de treinamento deve considerar novas metodologias de operação, manutenção e gerenciamento energético, como assim também a compreensão e manejo das modernas tecnologias que podem ser implementadas nos sistemas de monitoramento e controle. Isto é, capacitam-se os trabalhadores para compreender e administrar o SGIE implementado.

O programa de treinamento poderá ser dividido em treinamento para a CIGE e treinamento para o nível técnico. O primeiro envolve aspectos gerais de gerenciamento e metodologias de conscientização: como implementar, como influenciar os tomadores de decisão, como motivar mudanças de hábitos, quais são as necessidades de medição necessárias e quais são as metodologias de controle e avaliações de resultados a serem utilizadas.

O treinamento para o nível técnico deverá incluir aspectos gerais de manutenção associados à eficiência energética e sua inserção nos programas de qualidade existentes, bem como metodologias de operação de determinados equipamentos consumidores de energia para atingir uma operação mais eficiente.

### **Elaboração da documentação do SGIE**

Deve-se formular procedimentos, registros e manuais para a documentação do SGIE implementado. Dentre os procedimentos que devem ser documentados estão:

- Comunicação;
- Controle e modificação da documentação do Sistema;
- Compra de energia;
- Execuções de ações corretivas e preventivas;
- Auditorias periódicas do SGIE.
- Instruções de trabalho do SGIE (operação, manutenção e produção).

O manual do SGIE deve conter no mínimo:

- Informes técnicos das características energéticas da empresa e de cada centro de custo;
- Protocolo de compromissos de implementação do sistema;
- Esquemas do consumo energético atual e recomendado;
- Diagrama energético produtivo da unidade consumidora;
- Pareto de consumos térmicos e elétricos por áreas e equipamentos;
- Tabelas de consumo e índices de consumo;

- Arvore de indicadores base 100 (comportamento dos resultados em relação às metas, tomando como referência da mesma o valor 100) de eficiência energética da unidade consumidora por portador energético primário;
- Modelo de controle do processo a nível gerencial com a inserção do SGIE proposto;
- Softwares e ferramentas de monitoramento por centro de custos e a nível global;
- Procedimentos de monitoramento;
- Tabelas de registros;
- Planejamento de ações de curto médio e longo prazo;
- Programas de manutenção dirigidos à eficiência;
- Programas de boas práticas operacionais;
- Programas de inovação e gestão tecnológica;
- Planejamento de preparação dos trabalhadores;
- Metodologias de auditorias do sistema.

### **2.3.3 Operação do SGIE**

Nesta etapa deve-se assegurar a melhora continua do SGIE, mantendo o interesse e o comprometimento de todas as áreas e de todo o pessoal da organização. Para tanto devem ser desenvolvidas as atividades descritas brevemente a seguir.

#### **Avaliação dos Resultados e Acompanhamento e Divulgação de Indicadores Energéticos**

Periodicamente avaliam-se os resultados monitorados, elaboram-se gráficos dos indicadores de gestão e verifica-se o atendimento ou não dos objetivos e metas.

Com o objetivo de superar as dificuldades inerentes às resistências coletivas, a organização deverá demonstrar claramente sua intenção de atingir os objetivos de racionalização do consumo de energia. Com essa finalidade apresentam-se a todos os setores da organização os resultados atingidos no desempenho energético e informações relativas ao SGIE, buscando incentivar o pessoal a facilitar comentários e sugestões de melhorias, aproveitando ao máximo a experiência e o conhecimento de todo o pessoal.

#### **Acompanhamento e Avaliação de Boas Práticas de Operação, Manutenção e Coordenação**

É necessário manter todo o pessoal comprometido com o SGIE. Espera-se conseguir mudanças e consolidação de hábitos operacionais, de manutenção, de produção e de coordenação visando melhores praticas ao nível tático.

## **Implementação de Programas e Projetos de Melhoria**

O planejamento deve ser realizado de forma contínua e deve propor novos objetivos e metas, planejar eventos como programas de treinamento, auditorias, projetos de pesquisa, palestras, entre outros.

Mediante projetos desenvolvidos pela vigilância tecnológica aperfeiçoam-se os sistemas de medição e monitoramento e os de atuação e controle, inserindo tecnologias mais eficientes.

## **Auditorias Gerais**

Devem ser formuladas as metodologias das auditorias e de revisões do cumprimento de requisitos, identificadas desconformidades, determinadas ações corretivas e preventivas. São planejados ajustes e atualizações dos registros do SGIE.

## **Auditorias Específicas**

Ao fazer auditorias específicas, em vez de resultados de caráter geral, podem ser obtidos resultados muito mais significativos. Dentre as auditorias que podem ser consideradas estão as realizadas na:

- Operação e manutenção;
- Ar comprimido;
- Ar condicionado;
- Motores;
- Iluminação;
- Sistema de vapor;
- Água.

## **Verificações da Alta Direção**

Estados, desempenhos e recomendações sobre o SGIE devem ser transmitidos para a alta direção a fim de realizar a revisão. Com base nessas informações, a administração pode tomar medidas que mudem as políticas energéticas, objetivos, metas, indicadores de gestão ou alocação de recursos, de modo de garantir a melhoria continua, adequação e efetividade do SGIE.

## **Ajuste do SGIE**

Após a análise, a alta direção deve decidir as ações a serem conduzidas relativas a alterações no desempenho energético, na política energética e nos indicadores de gestão.

## 2.4 Sistema de Controle para a Gestão da Energia

De acordo com o colocado em seções anteriores, para gerenciar os recursos energéticos é necessário tomar decisões e atuar sobre o consumo, transformação e geração de energia. Para incrementar a eficácia destas ações é recomendável que as atuações sejam realizadas de forma automática. Assim, torna-se importante o papel da adequada definição de um sistema de atuação e controle.

É essencial que ao especificar o EMCS se tenha um olhar além das tecnologias, ou seja, deve-se conhecer não só a construção do edifício e os sistemas mecânicos e elétricos a serem controlados, mas também as pessoas que ocupam o edifício, seus hábitos e o nível de formação e apoio que terá o operador do EMCS (Turner e Doty, 2006).

### 2.4.1 Requisitos do EMCS

O ser humano é capaz de fazer um controle manual considerado adequado porque pode pensar, considerar e processar muitas variáveis em conjunto. Mas muitas tarefas de controle são repetitivas e necessitam de decisões extremadamente rápidas, sendo conveniente a mecanização dos processos, com o ser humano realizando a tarefa de supervisão do sistema, haja vista que as máquinas adotam decisões baseadas apenas na medição de algumas variáveis e processos, mas não possuem competências para analisar o entorno e as consequências de suas ações, da forma que pode fazer um operador humano.

Nesse contexto, certas rotinas de controle podem ser implementadas especificamente para conseguir o uso eficiente de energia, sendo este um dos requisitos do EMCS.

O EMCS também deve atender a regra 80/20 de Pareto, a qual afirma que geralmente se consegue 80% dos benefícios com apenas 20% dos esforços, porém os 20% dos benefícios restantes exige uma percentagem muito maior de esforços. Assim, através da implementação do um processo de otimização pretende-se que o EMCS alcance mais benefícios do que os obtidos com controladores básicos, obtendo aqueles benefícios que requerem mais esforços.

O apropriado uso de otimização depende das prioridades da organização, portanto estas devem ser testadas antes de tomar a decisão de otimizar. Se a prioridade da organização for a simplicidade, então serão necessários somente controles muito básicos e a otimização deixa de ser prioridade. Da mesma maneira, para projetos onde a confiabilidade é a principal prioridade, pode ser mais simples e econômico usar apenas rotinas básicas de controle em detrimento da otimização.

Em resumo, simplicidade máxima e eficiência máxima são impossíveis de serem obtidas simultaneamente.

### **2.4.2 Funções e Benefícios do EMCS**

Um EMCS bem concebido e operando adequadamente oferece à organização uma enorme gama de benefícios, que podem muitas vezes ser agrupados e quantificados. Esses benefícios podem superar amplamente os investimentos que devem ser realizados para sua implantação.

Além dos benefícios financeiros imediatos também existem benefícios no longo prazo, com destaque para a redução dos impactos ambientais, afetando positivamente a sociedade em geral.

A seguir são citadas algumas funções do EMCS junto com os benefícios relacionados:

- Gerenciar o consumo e a demanda da energia: reduz despesas operacionais, acrescenta lucros e aumenta a competitividade. Reduz a poluição atmosférica, chuva ácida e o aquecimento global (Pimpinella et al., 2010);
- Otimizar o funcionamento dos aparelhos consumidores de energia: aumenta a vida útil dos equipamentos, aumentando lucros e a competitividade (Rocha e Monteiro, 2005);
- Melhorar o conforto: melhora o desempenho dos trabalhadores, ajudando-os a estar mais descansados e cometer menos erros, aumentando a produção (Turner e Doty, 2006);
- Ativar alarmes de mau funcionamento dos equipamentos: permite uma resposta mais rápida ante falhas e, conseqüentemente, menos interrupções não desejadas da produção (Wang et al., 2011);
- Administrar o serviço de manutenção: obtêm-se melhores registros, reduzindo o tempo de inatividade (Rocha e Monteiro, 2005);
- Monitoramento de equipamentos que usam energia: os dados acumulados proporcionam melhor desempenho de todas as funções do EMCS (Han e Lim, 2010);
- Realizar tarefas não relacionadas à gestão da energia: para cada tarefa não relacionada à gestão da energia haverá um benefício não relacionado com a gestão da energia, alguns de estes benefícios podem ser quantificados e outros não, mas todos devem ser considerados ao fazer o investimento (Turner e Doty, 2006).

### **2.4.3 Ações estratégicas dos EMCS**

Os EMCS podem ser programados para personalizar as estratégias tradicionais de gerenciamento de energia, melhorando continuamente o desempenho dos sistemas de controle e proporcionando enorme flexibilidade que munem diversas funções tais como:

- Algoritmos de controle de carga de forma tal a não ultrapassar a demanda contratada, sendo no Brasil integralizada em períodos de quinze minutos (Neusser, 2009; Roja, 2009);
- Controlar o fator de potência das cargas;
- Controlar geradores distribuídos, proporcionando uma adequada integração dos diversos recursos energéticos, tanto para uso interno como para a possível comercialização de excedentes (Kirschen, 2003; Villalba, 2003);
- Controlar parâmetros de qualidade da energia, tanto para a energia recebida das concessionárias como para a gerada internamente, e também medir e controlar possíveis distorções de parâmetros de qualidade devido a processos internos (Nazaré et al., 2009; Wang et al., 2010);
- Realizar, de maneira dinâmica e automática, a reconfiguração do arranjo de conexões dos circuitos monofásicos ligados à rede de distribuição de energia elétrica, efetuando a comutação suave destes circuitos de uma fase para outra, sem inserir harmônicos na rede ou provocar danos às cargas, a fim de evitar perdas entre fases do transformador e sobtensões (Gomes et al., 2010).

Segundo Turner e Doty (2006) outras funções também poderão ser implementadas como rotinas especiais, como por exemplo:

- Programação diária. Esta rotina incorpora funções de ligar e desligar diversos equipamentos para cada dia da semana.
- Programação de feriados. Estabelece funções para feriados que podem ser configurados com até um ano de antecedência. Normalmente cada feriado pode ser programado para um desligamento completo ou para dias especiais que exijam desligamento parcial das instalações.
- Agendamento anual. Normalmente qualquer número de pontos de controle pode ser atribuído a rotinas especiais de programação anual.
- Limitar a demanda. Limitações da demanda podem ser baseadas em um único medidor elétrico ou vários medidores. Geralmente as cargas são ligadas e desligadas em ordem de prioridade com a finalidade de não ultrapassar a demanda contratada.
- Tempo mínimo de ligado e desligado. Normalmente um equipamento é ligado e desligado em função das temperaturas, horários, ciclos de funcionamento e de outros parâmetros ambientais. Outros aparelhos têm um tempo mínimo que devem permanecer desligados antes de tornar a ligá-los. Existem rotinas que permitem ao operador estabelecer esses tempos mínimos para cada dispositivo.
- Ótimo *Start/ stop*. Os sistemas DDC podem fornecer rotinas que consideram o clima exterior e interior para ligar e desligar no momento mais adequado os sistemas de refrigeração e aquecimento.
- Limitador de demanda em refrigeradores. Essa rotina faz uma redução da capacidade disponível de resfriamento em varias etapas fixadas.

- Manual. Esta rotina fornece horários de substituição de procedimentos manuais para automático em determinados equipamentos e em períodos de tempo específicos.
- Registros. Os sistemas DDC podem rastrear e exibir vários tipos de informações, tais como última vez que um dispositivo foi desligado, temperaturas e outras variáveis, podendo essas informações serem acumuladas e exibidas mensalmente.
- Alarme de monitoramento e relatório. Sistemas DDC podem registrar e exibir alarmes para condições tais como: execução manual de um comando de máquinas em um lugar remoto, falha de equipamentos, altas temperaturas, baixas temperaturas, problemas de comunicação.

#### **2.4.4 Gestão pelo lado da demanda**

A gestão da demanda inclui a planificação e implementação de atividades projetadas com a finalidade de influir no uso energético de modo de produzir um efeito desejado na curva de consumo. Inclui os efeitos tanto sobre os horários de consumo quanto na magnitude e configurações de consumo.

Essa definição indica que existe uma ampla gama de atividades que podem ser realizadas para incidir no comportamento da demanda, dentre elas: reduzir a demanda, administrar os custos da eletricidade, utilizar geração distribuída e controle de cargas.

Um subconjunto do planejamento de gestão da demanda pode ser definido como o controle de consumo de eletricidade em resposta às condições definidas pela distribuidora. Essa resposta depende do enquadramento tarifário em que se encontra o consumidor e o objetivo pode não ser apenas redução do consumo, mas sim redução nos custos energéticos e/ou na melhora da confiabilidade do sistema (Jiang and Steven, 2011).

Em mercados em que o preço da energia varia continuamente, a gestão da demanda constitui uma alternativa atrativa para os consumidores, devido a que em panoramas de preços altos pode-se diminuir o consumo, deslocando o mesmo para períodos nos quais os preços sejam mais baixos (Alfonso, 2010).

#### **2.4.5 Algoritmos de Controle de Carga**

Os algoritmos de controle de carga permitem aplicar técnicas de gerenciamento de carga em tempo real, mediante ações baseadas na aquisição de dados provenientes de redes de medidores e sensores. Estes dados podem ser: demanda instantânea, fator de potência, demanda máxima permitida, estado de equipamentos, disponibilidade de geração distribuída, estado de outras variáveis como água, gás, vapor, calor, temperaturas ambientais, iluminação natural, entre outras.

Existem vários algoritmos de controle de carga aplicados ao gerenciamento da demanda contratada, segundo o intervalo de tempo em que é estimada a demanda, denominado período

de integração (Antonio, 2007; Neusser, 2009; Subirachs et al., 2010). Neste período podem ocorrer demandas instantâneas bem superiores à máxima projetada, desde que no intervalo de integração (15 minutos no caso do Brasil) esta não ultrapasse o valor contratado. Para poder realizar um adequado controle deve haver um sincronismo do sistema com o medidor da concessionária, isto é, o controlador deve saber quando inicia e termina um período de integração.

## **2.5 Conclusão**

A implementação de um SGIE pode-se refletir em um grande impacto sobre os custos de produção e a competitividade empresarial, contribuído ainda para a conservação do meio ambiente. Porém, sua implementação requer de uma adequada infraestrutura de medição e monitoramento, que permita fazer a adequada aquisição e tratamento de dados para auxiliar na tomada de decisões e na atuação em tempo real. Portanto, para uma adequada gestão da energia é fundamental contar com um sistema de monitoramento e controle inteligente em tempo real, o qual será objeto de estudo nos próximos capítulos. Porém, também é fundamental aproveitar o estoque de conhecimento que toda a organização possui armazenada em seus trabalhadores, devendo incentivar mecanismos que facilitem a geração de ideias, haja vista que muitas soluções para uma boa gestão energética estão na própria organização.

# Capítulo 3

## Requisitos Tecnológicos para a Viabilização de uma Microrrede Inteligente

### 3.1 Micro Redes

Uma microrrede constitui um pequeno sistema elétrico e térmico, autogerenciado localmente em uma determinada microrregião. A mesma geralmente conta com um sistema de geração, transformação e distribuição de energia, a qual é destinada ao atendimento de vários centros de carga interligados (Huayllas et al., 2011). Uma de suas principais vantagens é a possibilidade de integrar diversos REDs e, assim, potencializar a utilização de fontes alternativas de energia, tais como biogás, solar, eólica e pequenas centrais hidrelétricas (Marnay e Venkataramanan, 2006; Ghosh et al., 2009). Em algumas destas fontes alternativas pode-se considerar a possibilidade de aproveitar parte da energia térmica liberada no processo de geração de eletricidade, procedimento conhecido como cogeração, que se torna possível dentro de uma microrrede devido ao fato das unidades cogeradoras encontrarem-se próximas das instalações que utilizam a energia térmica, a qual, diferentemente da eletricidade, não pode ser facilmente transportada por grandes distâncias (Lasseter e Piagi, 2004).

Embora a utilização dos REDs poderia contribuir com o aumento da confiabilidade do sistema e reduzir custos, também trazem novos problemas, como a necessidade de sistemas de distribuição mais flexíveis e dinâmicos, capazes de suportar e controlar o fluxo bidirecional de energia. Assim, requer de controladores com abordagens ativas, de forma tal que a rede de distribuição possa ser modificada e reconfigurada de acordo com as mudanças no fluxo de potência, além de um grande número de sensores capazes de monitorar de forma eficiente diversas condições do sistema de distribuição, tais como: condições dos transformadores, estados dos disjuntores, magnitude e direção do fluxo de potência e falhas na rede (Alcântara, 2011).

Existem diversos tipos de REDs que podem ser utilizados em uma microrrede, tais como:

- Geração distribuída que, mediante geradores locais, podem adiar e reduzir o investimento para atender a crescente demanda de determinadas regiões, reduzir perdas de distribuição e proporcionar maior confiabilidade para a microrrede (Dugan e Granaghan, 2011);
- Geração a partir de fontes eólica e solar, que constitui um caso especial porque normalmente são variáveis e intermitentes. O planejamento do sistema de distribuição deverá considerar o impacto causado pelos altos níveis de penetração destas fontes. No entanto, o Brasil apresenta uma grande diferença em relação a outros países, devido a sua imensa biodiversidade, que permite a geração de energia por vários meios, como pequenas centrais hidrelétricas e a partir da biomassa, seja pela queima direta ou pela produção de combustíveis como o álcool, o biodiesel e, mais recentemente, o H-bio (Pacheco, 2006);
- Dispositivos de armazenamento de energia podem ser utilizados para minimizar os impactos causados pela variação e intermitência de geradores distribuídos. Ainda proporcionam um meio para implementar técnicas de resposta à demanda (Bardo, 2010);
- Veículos elétricos podem ser considerados como um caso especial de armazenamento distribuído, porém com maiores exigências de controle e interfaces com usuários. Neste aspecto será necessário considerar os impactos que causará um número crescente de veículos elétricos que interatuarão com o sistema de distribuição, e também a necessidade de dispor de um sistema de carga e tarifação inteligente para atender necessidades particulares de cada cliente;
- Outros recursos, como água, gás, vapor e outras formas de calor, também formam parte dos REDs disponíveis no ambiente que opera uma microrrede.

Deste modo, a microrrede constitui um sistema energético que pode proporcionar grandes benefícios para as unidades consumidoras, para o proprietário de um microgerador, para o sistema elétrico e também para o meio ambiente.

A unidade consumidora que também tem a possibilidade de gerar (*prosumer*) se vê beneficiada com um sistema de maior confiabilidade frente à faltas no sistema elétrico, devido à capacidade de trabalhar de forma isolada em momentos de corte do fornecimento de energia da concessionária, também conta com a possibilidade de aumentar a eficiência energética devido ao aproveitamento da energia térmica ao cogerar, uma energia de maior qualidade com níveis de tensão mais estáveis devido à reduzida distância entre fonte de geração e carga a alimentar. E ainda, alcança uma maior participação no mercado de energia, podendo comercializar excedentes em períodos de elevada geração interna (Huayllas et al., 2011).

Para o sistema elétrico a microrrede pode ser vista como uma única célula, podendo ser considerada como uma carga única, variável, despachada conforme a necessidade, que ainda pode fornecer serviços ancilares, ou entregar potência ativa a preços baixos em determinados períodos e fornecer ou consumir energia reativa destinada ao controle de tensão da rede.

Desse modo pode ser aumentada a qualidade e segurança de operação do sistema elétrico, evitando o congestionamento das redes de transmissão e distribuição devido ao crescimento natural do sistema e, ainda, reduzindo os custos de expansão do sistema de transmissão e de geração centralizada (Chaves, 2009).

Uma das principais características da microrrede é a sua capacidade de operar tanto em conjunto com o sistema elétrico da rede pública como também de forma isolada (Lasseter e Piagi, 2004; Huayllas et al., 2011).

Operando em conjunto com a rede pública a microrrede pode adquirir energia da concessionária em momentos de escassa geração interna e também, mediante um acordo entre ambas as partes, pode oferecer a produção de excedentes durante os períodos de elevada geração (Mozina, 2008).

Nas situações de graves quedas de tensão, faltas ou desligamentos da rede de distribuição, a microrrede pode operar de forma isolada. No entanto, isto implica numa mudança imediata no controle de potência dos microgeradores, já que eles passam a controlar a frequência da seção isolada. Essa transição para o modo de operação isolada deve ser feita mantendo a tensão e a frequência em níveis adequados para todas as cargas e a reconexão deve ser alcançada de maneira autônoma quando o evento de disparo não esteja mais presente. Porém, dependendo da tecnologia do disjuntor, podem ocorrer interrupções momentâneas durante estas transições (Huayllas et al., 2011).

Para que cada unidade geradora ou consumidora possa integrar-se na microrrede de forma estratégica e flexível, devem estar munidas de sistemas que proporcionem um controle automático que assegure sua operação adequada (Ghosh et al., 2009). Este controlador normalmente está formado por dispositivos de medição, decisão e atuação (Bouhafs et al., 2012).

E ainda, para que a microrrede possa gerenciar estrategicamente todas as pequenas fontes de geração e as diferentes cargas interligadas, funcionando como um único sistema de potência e calor que atende as necessidades locais com confiabilidade, segurança e qualidade e se integre ao sistema elétrico e ao mercado de energia, o controle de cada unidade deve ser realizado de forma integrada. Isto é, deve-se considerar o efeito que o controle aplicado a uma determinada unidade produz sobre as outras unidades do sistema (Subirachs et al., 2010; Roja, 2009). Por isso é necessário que todos os controladores individuais estejam interligados por meio de um sistema de comunicação, formando uma rede de automação e controle aplicada sobre um minissistema elétrico (Grenard et al., 2011).

A aplicação dos modernos dispositivos eletrônicos munidos de capacidade de comunicação, que conformam estas redes de automação e controle equipadas de sistemas SCADA (*Supervisory Control And Data Acquisition*) e HMI (Interfaces Homem- Máquina), quando aplicados em diversos setores, dá origem a uma nova concepção do sistema elétrico, chamada *Smart Grid* (Falcão, 2010; Bouhafs et al., 2012), cujas características relevantes são apresentadas a seguir.

## 3.2 Redes Inteligentes - *Smart Grid*

A *Smart Grid* consiste na modernização das tecnologias de geração, transformação, transmissão, distribuição e uso final da energia, mediante a incorporação de infraestruturas de comunicação digital e processamento de dados nos diversos setores do sistema elétrico, transformando-o em um sistema mais inteligente. A principal finalidade é que possibilite a implementação de capacidades avançadas no sistema de energia, tais como: redes autorrecuperáveis, otimização do consumo, incorporação e acomodação de diversas fontes distribuídas, aquisição de informações em tempo real de diversas variáveis e setores, e comunicação integrada que proporciona ao usuário final maior participação no planejamento e operação do sistema elétrico (Subirachs et al., 2010).

O principal desafio para a implementação de uma *Smart Grid* é o acoplamento de uma adequada infraestrutura de comunicação ao sistema elétrico, projetada para suportar operações de controle e interação entre centros de controle e subestações individuais e capazes de integrar monitoramento e controle de diversos dispositivos e fontes distribuídas. Também é necessário dispor de uma infraestrutura de medição avançada (AMI<sup>2</sup>) que facilite a prestação de serviços diferenciados e a integração do cliente com o sistema elétrico, fornecendo dados individuais de cada cliente, caracterizando-os como uma função de vários parâmetros (Dugan e Granaghan, 2011; Bouhafs et al., 2012).

Estas infraestruturas de comunicação, medição e controle, normalmente consistem de uma rede de automação industrial denominada *Field Area Network* (FAN), munida de diversas capacidades e funções, que podem ser divididas em partes menores formando hierarquias, nas quais os níveis inferiores contam com controladores locais distribuídos em diversas microrredes, subestações, centros de geração e consumos individuais e cujos sistemas de monitoramento fornecem valiosas informações acerca de perfis de alimentação de cargas, localização de faltas, funções de proteção e comportamentos dinâmicos de determinados locais. Estas informações são integradas a níveis superiores do sistema, formando assim uma arquitetura SCADA fornecendo avançadas funções de supervisão e otimização (Dugan e Granaghan, 2011).

Os centros de controle devem monitorar, atuar e interagir em tempo real sobre os dispositivos elétricos remotos, a infraestrutura de transmissão inteligente deve empregar novas tecnologias para melhorar a qualidade da energia e as subestações inteligentes devem coordenar os seus dispositivos locais com a principal finalidade de prever, detectar e corrigir falhas e gerenciar a geração e a demanda do sistema elétrico (Saidel et al., 2004).

Fazendo uso da comunicação bidirecional e da capacidade de controle automático, as concessionárias podem influenciar os consumidores, oferecendo-lhes precificação dinâmica, com tarifas menores nos momentos de carga leve, incentivando o uso de técnicas de gerenciamento pelo lado da demanda (Roja, 2009; Neusser, 2009). Ao mesmo tempo, uma

---

<sup>2</sup> AMI: *Advanced Metering Infrastructure*

serie de novos serviços podem ser oferecidos aos consumidores, incluindo a capacidade de participar ativamente no mercado energético, vendendo e comprando energia de diferentes fornecedores e clientes. Desta maneira o mercado de energia torna-se mais competitivo (Villalba, 2003; Kopacsi et al, 2007; Brown e Salter, 2011; Zafar et al., 2011).

A implementação da *Smart Grid* gera muitos pontos de dados a partir de uma variedade de dispositivos inteligentes interligados ao sistema elétrico. Mediante o processamento desses dados torna-se possível detectar, analisar e responder de forma automática e em tempo real a diversas variáveis. Assim, é possível detectar a ocorrência ou prever uma falha de forma muito mais eficiente, melhorando a confiabilidade do sistema, a qualidade da energia, a eficiência da rede e minimizando a interrupção do serviço. Porém, o funcionamento do sistema elétrico fica dependente da infraestrutura de comunicação necessária para que o sistema seja controlável, observável, automatizado e integrado. Portanto, além das questões de segurança relacionadas com os ataques físicos, também ganham importância as questões de segurança de ataques cibernéticos (Jeon, 2011). Em caso de qualquer inconveniente, espera-se que a rede seja capaz de detectar e isolar o setor afetado, de forma tal a minimizar o seu efeito e ainda acionar um alarme para acelerar a restauração do serviço (Wang et al., 2011).

Dentre as principais questões para a implementação da *Smart Grid*, destaca-se o conceito de interoperabilidade de sistemas. Pretende-se conseguir um sistema robusto, de baixo custo e preparado para suportar qualquer tipo de serviço ou aplicação, tal como uma “internet” voltada à gestão de recursos energéticos (Brunner, 2011).

O termo interoperabilidade pode ser definido como a capacidade de dois ou mais dispositivos ou sistemas trocarem informações de forma transparente, atingindo inteiramente suas finalidades. Para tanto, é necessários que os diversos setores do sistema elétrico adotem os mesmos padrões de comunicação ou, simplesmente, adotem um padrão aberto, garantindo assim os menores investimentos na implementação e os menores custos durante toda a vida útil das aplicações (Turner e Doty, 2006). Nesse sentido, diversas organizações nacionais e internacionais estão unindo esforços para conseguir uma padronização dos protocolos de comunicação com o objetivo de facilitar a interoperabilidade e a composição de um conjunto de tecnologias, normas e padrões que facilitem a construção das *Smart Grids*.

A agência Norte Americana NIST (*National Institute of Standards and Technology*) publicou em 2010 o documento: “*NIST Framework and Roadmap for Smart Grid Interoperability Standards, Release 1.0*”. O mesmo cria um marco conceitual para examinar as necessidades da *Smart Grid*, proporcionando uma lista de normas existentes e estabelecendo um conjunto de medidas prioritárias para avançar no planejamento da normatização do setor, melhorando a interoperabilidade dos sistemas, desenvolvendo arquiteturas robustas e definindo os requisitos para a adequada segurança dos dados através da rede lógica.

O modelo conceitual do NIST é um conjunto de diferentes pontos de vista e descrições que conformam a base fundamental para a discussão das características, usos, comportamentos, interfaces, requisitos e normas no âmbito da *Smart Grid*. Porém, o modelo não representa a arquitetura final e

sim um marco conceitual, uma ferramenta para descrever e discutir o desenvolvimento da citada arquitetura.

O modelo ainda destaca as principais áreas do problema de interoperabilidade e ajuda a resolver problemas de interdependências entre o sistema elétrico e outras infraestruturas, e também reflete o papel cada vez mais importante da tecnologia. O modelo conceitual é composto de sete domínios: clientes, mercado, prestador de serviços, regulador, geração, transmissão e distribuição, que se conectam e interatuam através de interfaces de caráter elétrico e redes de comunicação.

Também o IEEE publicou em setembro de 2011 o documento: “*Draft Guide for Smart Grid Interoperability of Energy Technology and Information Technology Operation with the Electric Power System (EPS) and End-Use Applications and Loads*”. O mesmo fornece uma base de conhecimento, endereçamento, terminologias, características, desempenho funcional, critérios de avaliação, bem como princípios de engenharia, para consolidar a interoperabilidade entre o sistema de fornecimento de energia, as aplicações dos usuários e as cargas em uma *Smart Grid*.

A infraestrutura de comunicação em redes elétricas permite o intercâmbio de um enorme volume de informações, que torna possível as funções de classificação e localização de dispositivos distribuídos trabalhando sinergicamente.

Desempenhos insatisfatórios de comunicação não só limitam a *Smart Grid* para atingir sua plena eficiência energética e qualidade de serviços, mas também suscitam danos potenciais para a rede. Para proteger a *Smart Grid* e garantir o funcionamento ideal, além da interoperabilidade existem outros requisitos que devem ser atendidos, tais como: a sincronização entre os IEDs, o suporte a mensagens globais e a latência da rede, que define o tempo máximo em que uma determinada mensagem deve chegar ao seu destino através de uma rede de comunicação (Wang et al., 2011).

A latência de comunicação nas *Smart Grids* é definida como um lapso de tempo transcorrido entre o envio de uma mensagem desde a fonte IED (*Intelligent Electronic Devices*) e a sua respectiva recepção no destino IED. O atraso final está composto pela soma de todas as porções de tempo utilizadas pela mensagem durante seu processamento e transmissão em cada nó atravessado. A fonte transmissora insere alguma demora em adequar a mensagem para sua respectiva transmissão, cada nó de encaminhamento acrescenta um atraso extra para processar e transmitir a mensagem, e o IED de destino incorpora mais tempo para decodificar a mensagem e apresentá-la para o objetivo de aplicação.

Diferentemente de outras redes de automação industrial, a *Smart Grid* possui requisitos de latência críticos para seus sistemas de comunicação. Alguns tipos de trocas de informações entre dispositivos elétricos são úteis apenas dentro de um prazo pré-definido. Se o atraso for superior ao permitido, as informações comunicadas não poderão cumprir seus objetivos e ainda, na pior das hipóteses, podem ocasionar danos na rede.

Então, as mensagens comunicadas entre diversas entidades da rede elétrica podem ter diferentes requisitos de latência. Por exemplo, as informações de proteção e comando

trocados entre IEDs em uma rede de distribuição vão exigir uma latência menor do que as mensagens trocadas entre informações SCADA, sensores elétricos e centros de controle. Além disso, as mensagens trocadas podem ser eventos conduzidos (por exemplo, relações de proteção e controle) ou periódicos (por exemplo, relações de monitoramento) (Bobba et al., 2012).

A arquitetura de rede e os meios de comunicação devem suportar as diferentes necessidades. A arquitetura de rede irá determinar se a mensagem enviada de uma entidade comunicada com outra vai chegar ao seu destino em um ou mais pontos intermediários, afetando diretamente a latência do sistema. Da mesma forma, as taxas de dados suportadas pelo meio de comunicação também ditam o quão rápido uma entidade pode comunicar um evento observado ou responder a uma mensagem recebida (Jeon, 2011).

A IEC (*International Electrotechnical Commission*) também trata de algumas questões referentes às comunicações na *Smart Grid* e propôs uma série de normas relativas à comunicação e controle de sistemas de energia elétrica e automação de subestações, entre elas as normas IEC 61850 e IEC 60870.

A IEC 61850 (*Communication Networks and Systems for Power Utility Automation*), originalmente projetada para a automação de subestações, inclui em seu escopo de aplicabilidade a geração e troca de informações entre geração e subestações. Os usuários podem, inclusive, considerar a IEC 61850 para aplicações em sistemas de geração distribuída e hidroelétricas, uma vez que a norma foi recentemente estendida para cobrir tais sistemas.

A IEC 60870-5-101 / -104 é amplamente usada como norma de comunicação entre subestações e o centro de controle e contém seis partes que especificam os requisitos gerais relativos à interoperabilidade e desempenho do sistema de potência, necessitando portanto de um gateway para o mapeamento de IEC 61850 a IEC 60870-5-101 / -104. Pretende-se que no futuro a IEC 61850 seja utilizada como protocolo de comunicação para que o centro de controle integre dispositivos de campo localizados fora das subestações (Brunner, 2011).

A IEC 61850-1 define mensagens de alta velocidade (sistemas de proteção), média velocidade (informações de medidas, estados e comandos) ou baixa velocidade (parâmetros, eventos, transferência de arquivos), além dos sinais de sincronismo. As mensagens de alta velocidade são denominadas GSE (*Generic Substation Events*) e podem ser classificadas em GOOSE (*Generic Object Oriented Substation Event*), ou GSSE (*Generic Substation Status Event*). A diferença entre ambos é que, nas mensagens GOOSE, a informação é configurável e utiliza um agrupamento de dados. As mensagens GSSE somente suportam uma estrutura fixa de informação de estado, a qual é publicada e disponibilizada na rede (Mohagheghi et al., 2011).

As comunicações podem ser verticais, realizadas entre níveis hierárquicos diferentes, ou horizontais, que ocorrem dentro do mesmo nível. As informações verticais são comunicações entre IED e o sistema de aquisição de dados SCADA no modo cliente-servidor, os dados são fornecidos pelo servidor, por solicitação do cliente, ou automaticamente, a partir de eventos

predefinidos. Neste tipo de comunicação, o cliente é quem controla a troca de dados. As comunicações horizontais, por sua vez, utilizam o modo editor-assinante, ou produtor-consumidor, em que o editor distribui as informações na rede, para um, alguns ou todos os IEDs. O IED assinante, que pode ser qualquer um dos IEDs, recebe da rede aquelas informações que lhe forem necessárias (Arzuaga et al., 2011).

Com o fim de serem mais rápidas, as comunicações horizontais, não requerem de sinais de confirmação. Como o receptor não confirma a recepção da mensagem o transmissor de mensagens GOOSE utiliza o serviço SCSM (*Specific Communication Service Mapping*), que usa um esquema de retransmissão especial para alcançar um nível de confiabilidade adequado, que consiste em repetir a mensagem por diversas vezes. A cada nova tentativa, o tempo de espera é dobrado, de modo a minimizar colisões, até atingir um valor máximo (da ordem de vários segundos). Depois de atingido esse intervalo máximo, a mensagem é repetida indefinidamente, mantendo este último intervalo. Se o envio do sinal é descontinuado o receptor assume que a conexão foi perdida. As mensagens GOOSE são sinais de estado binário e se utilizam, entre outros objetivos, para o disparo de relés de proteção (Mohagheghi et al., 2011).

Segundo diversos autores, as tecnologias de rede disponíveis atualmente nem sempre são capazes de satisfazer os estritos requisitos de latência de uma *Smart Grid*. No trabalho de Wang (2011) são apresentados resultados experimentais que mostram que o atraso de comunicação dentro de uma única Ethernet é inferior a 2ms, porém o atraso aumenta significativamente em redes sem fio e redes de múltiplos saltos. Em relação às redes sem fio, dois computadores unidos através de Wi-Fi padrão IEEE 802.11b, comunicando-se a um ponto de acesso compartilhado tem apresentado um retardo de 3,2 a 17ms tornando-se, portanto não viável para transmissão de informações de proteção, no entanto viável para informações de controle e outras aplicações. Um computador ligado a uma placa de comunicação XBee-PRO tem apresentado um retardo de 12ms a 86ms, portanto, segundo esses resultados, o ZigBee só pode ser utilizado para transmitir dados insensíveis ao tempo.

Também segundo Suárez (2010), uma WPAN, desenvolvida com tecnologia ZigBee para monitorar e controlar uma carga indutiva, consegue tempo de respostas de 20ms a uma distância de 30m entre receptor e transmissor. Enquanto que tecnologias GPRS possuem latências da ordem de 500ms a 2s por link, porém suas variações são altas e dependem de diversos fatores, ficando limitadas para diversas aplicações (Munsuri et al., 2010).

A infraestrutura de comunicação em redes inteligentes incorporam muitas tecnologias de rede que irão assumir uma composição hierárquica e híbrida. Diferentes tipos de redes são utilizados para proporcionar facilidades de comunicação em diferentes partes ou regiões da rede e estão interligados para formar a infraestrutura completa (Grenard et al., 2011). O atraso experimentado por uma mensagem depende de muitos componentes, haja vista que a mensagem viaja dentro de cada sub-rede e através das interfaces entre sub-redes. Os vários componentes de retardo geralmente podem ser classificados da seguinte forma (Stallings, 2004; Wang et al., 2011):

- Retardo na aquisição de dados. É o retardo que ocorre a partir do momento que um sinal analógico de alguma variável física, como tensão, corrente ou temperatura, muda seu estado até que seja capturado, convertido em um sinal digital, processado e disponibilizado para a transmissão por meio de um dispositivo de aquisição como os descrito na sessão 3.5.4.
- Atraso de processamento de pacotes. Os dados são transmitidos através de uma rede de comunicação, seguindo os protocolos de rede especificados. Cada etapa de processamento de pacotes adiciona demora extra para o tempo total gasto pelo pacote na rede.
- Atraso de transmissão de pacotes. Cada nó intermediário no caminho de transmissão de pacotes verifica a correção de dados depois de receber o frame completo de dados e antes de encaminhar o pacote para o próximo nó. Retardos de transmissão ocorrem em cada nó para o envio e recebimento dos frames de dados.
- Atraso de acesso ao meio. Múltiplos nós de envios de dados que compartilham o mesmo meio de transmissão, tais como o espectro sem fio e cabo de telefonia fixa, competem pelo acesso ao meio para transmitir os seus respectivos dados. Um nó tem que esperar até sua vez para a transmissão. Da mesma forma, um pacote em um nó antes de seguir seu caminho tem que esperar até que todos os outros pacotes anteriores sejam transmitidos.
- Retardo de resposta a eventos. Alguns tipos de mensagens de estados de IEDs requerem de ações em resposta aos eventos. Por exemplo, uma tensão medida superior ao valor normal deverá disparar um disjuntor fora de comando da estação de controle. O sistema de gerenciamento inteligente de energia e falhas que residem no nó de ação responsável pode gastar algum tempo para decidir que decisão tomar.

Com o objetivo de minimizar os retardos de comunicação algumas estratégias podem ser empregadas. Primeiramente selecionar uma tecnologia de rede adequada para cada aplicação. Porém, além dos requisitos de atraso, outros fatores devem ser considerados, como a conveniência da implementação e o custo dos equipamentos, que também afetam a decisão (Gao et al., 2011). Pode-se recorrer a técnicas de mapeamento de rede, pois algumas tecnologias de rede oferecem mecanismos de comunicação rápida para suportar o tempo de entrega de mensagem crítica. Assim, cada tipo de mensagem pode ser transmitida por meio de uma tecnologia que atenda seus requisitos de retardo (Grenard et al., 2011).

Devido ao retardo de comunicação ser definido de ponta a ponta, incluindo todos os segmentos da rede atravessados pelas mensagens, é importante projetar e implantar estruturas de rede simples, que envolvam o menor número de passos intermediários, para minimizar os retardos de comunicação (Stallings, 2004, Bobba et al., 2012).

A infraestrutura de comunicação é compartilhada por todos os tipos de mensagens, as quais possuem diversos requisitos de retardos. Portanto deve-se proteger o tempo de entrega

de mensagens que possuem requisitos de retardo mais críticos, para o qual podem ser usadas algumas estratégias:

- Priorização de mensagens. Diferentes tipos de mensagens podem ser priorizados de forma diferente com os níveis de prioridade correspondente às urgências do tempo. Às mensagens de alta prioridade devem ser alocados recursos da rede para transmissão rápida antes que às mensagens de baixa prioridade (Jeon, 2011).
- Seleção de uma adequada arquitetura de rede. Normalmente a adoção de arquiteturas de controle distribuído requer de menores distâncias para os meios de comunicação e menor quantidade de dados a serem processados, consequentemente, reduzem o tempo de resposta do sistema (Grenard et al., 2011).
- Controle de admissão. Quando ocorrer congestionamento na rede as entradas de mensagens de baixa prioridade podem ser limitadas para resolver o problema de congestionamento. O controle de admissão, portanto, garante a disponibilidade de comunicação para as mensagens de alta prioridade, de forma a atender suas necessidades de retardo. No entanto, os esquemas de controle cuidadosamente projetado não devem limitar excessivamente o acesso à rede de mensagens de baixa prioridade, de tal modo que a utilização razoável da rede ainda seja mantida (Wang et al., 2011).
- Filtragem de dados. A aplicação de controle distribuído permite executar diversas ações localmente e somente transferir aquelas informações relevantes para os centros de controle, diminuindo o tráfego na rede e, consequentemente, aumentando o tempo de resposta (Grenard et al., 2011).

A priorização e estratégias de controle são métodos gerais. Dada a complexa estrutura de rede e a diversidade de tipos de comunicação, é necessário trabalhar em muitos detalhes de implementação, como por exemplo o número de níveis de prioridade, alocação de recursos em cada nível, mapeamento de prioridade para cada tipo de comunicação, a transição de prioridade entre diferentes redes, a admissão de critérios de controle e ajustes dinâmicos de controle.

### 3.3 *Smart $\mu$ Grid*

A transformação da rede de energia elétrica atual para a *Smart Grid* deverá acontecer de forma incremental: novas tecnologias de automação, computação e comunicação serão introduzidas em partes da rede, formando bolsões de sub-redes com as características da *Smart Grid* (Falcão, 2010; Gao et al., 2011).

Estes bolsões de sub-redes são denominados *Smart  $\mu$ Grid* (micro redes inteligentes) e baseiam-se na utilização dos conceitos de *Smart Grid* aplicados em uma microrrede, com o objetivo de gerenciar integralmente, de forma eficaz e inteligente, os diversos REDs nela

inseridos, admitindo a implantação de estratégias de controle e otimização de forma muito eficiente, mediante redes de comunicação local (LAN), confiáveis, seguras e de alta velocidade de transmissão de dados. A microrrede é capaz de constituir um minissistema de energia elétrica que pode operar de forma semiautônoma, conectado ao sistema da concessionária ou isolado. A Figura 3.1 ilustra as funções básicas de uma *Smart  $\mu$ Grid*.

A *Smart  $\mu$ Grid* deve ser entendida mais como um conceito do que uma tecnologia ou equipamento específico, não sendo possível abrir um catálogo comercial e comprar uma *Smart  $\mu$ Grid*, porém sendo possível reunir tecnologias e construir uma para atender determinadas necessidades e continuamente expandi-la para acolher novos panoramas. A *Smart  $\mu$ Grid* é, portanto, um projeto de vários projetos e sua construção é uma tarefa contínua que requer de vigilância tecnológica. Por esse motivo, a seguir será apresentado um estudo dessas tecnologias, suas características e suas possibilidades de integração.

Conforme ilustra a Figura 3.2, a estrutura básica de uma *Smart  $\mu$ Grid* está composta por uma infraestrutura de dispositivos sensores e de medição, uma infraestrutura de dispositivos de atuação e uma arquitetura de interface com o usuário, todos interligados através de um sistema de comunicação (Berlanda, 2010; Dugan e Granaghan; 2011).



Figura 3.1: Funções básicas de uma *Smart  $\mu$ Grid*. Fonte: Moraes (2010).

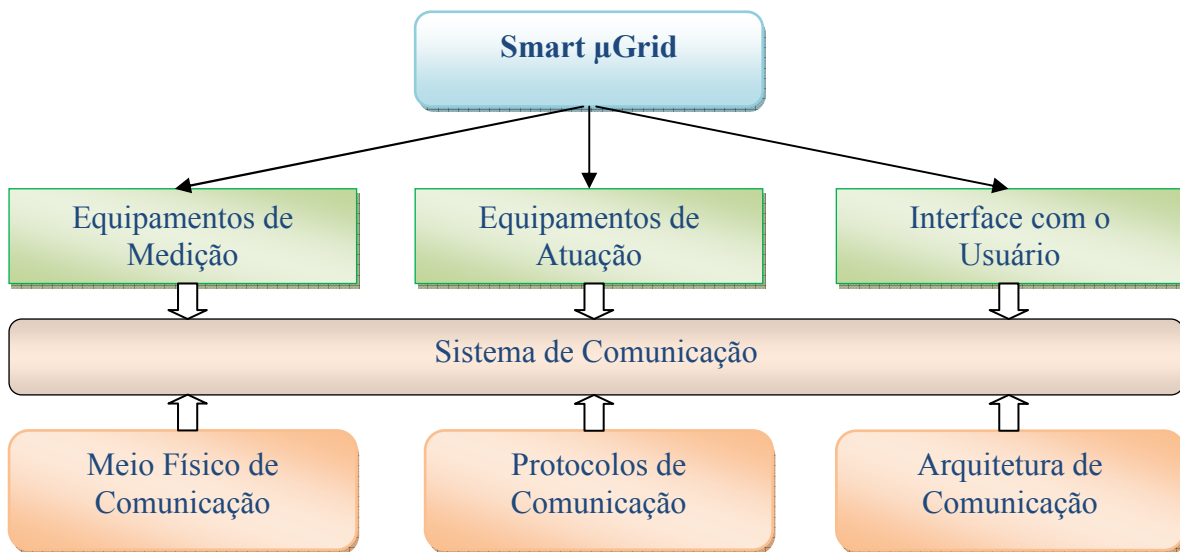


Figura 3.2: Arquitetura geral de uma *Smart μGrid*.

O sistema de comunicação necessita de um meio físico de comunicação, protocolos que possibilitem a transferência de dados entre os dispositivos e entre as camadas de redes e uma arquitetura própria de comunicação que é a que define de que maneira os dispositivos são interconectados.

### 3.4 Arquiteturas de Controle

Muitos processos precisam de atenção e de ajustes para manter ou mudar certas condições, alguns exemplos são comum em seres vivos, tais como a temperatura corporal e a pressão arterial, entre diversos outros. Semelhantemente o campo de controle automático consiste em ajustar continuamente um dispositivo para manter uma variável medida em um estado desejado.

Controle é o ramo do conhecimento que estuda maneiras sistemáticas de descrever sistemas e sintetizar ações, de forma tal que estes sistemas se comportem da maneira previamente determinada. Por outro lado, a automação estuda maneiras de implementar e de realizar ações para tornar um sistema ou processo automático, sendo que tais ações podem ou não ter tido sua origem na área de controle (Aguirre, 2007).

#### 3.4.1 Controle Digital Direto ou DDC<sup>3</sup>

Esta tecnologia de controle utiliza microprocessadores para desenvolver suas tarefas e permite fazer mudanças no sistema automaticamente através do seu *software*, sem necessidades de alterações físicas e investimentos em outras tecnologias.

---

<sup>3</sup> DDC: *Direct Digital Control*

Informações discretas (*on-off*) são traduzidas como “1” ou “0”. Para os processamentos analógicos são utilizados conversores digital-analógico e analógico-digital. Quanto maior a resolução destes conversores D/A e A/D mais os sinais digitais se parecerão aos sinais analógicos e mais suave será o controle. Estas tecnologias permitem estabelecer interfaces gráficas com o usuário mediante displays, botões e telas, dando ao sistema de controle maior aceitação e flexibilidade, reduzindo o nível de habilidades necessárias para a navegação e controle do sistema. A interface gráfica pode utilizar ícones facilmente reconhecíveis, símbolos, cores e mensagens codificadas, alarmes e outros métodos visuais (Turner e Doty, 2006; Booba et al., 2012).

Uma das melhorias dos sistemas de controle digital nos últimos 30 anos tem sido o conceito de controle distribuído. Esta mudança tecnológica ocorreu em resposta às reclamações por perdas generalizadas do controle por simples falhas em um único ponto. Atualmente é possível usar múltiplos controles distribuídos em cada ponto e estes podem operar de forma individual, ou então comunicar-se com uma central de supervisão formando uma rede de automação industrial ou *Field Area Network* (FAN).

### **3.4.2 *Field Area Network* (FAN)**

No começo as FANs eram conhecidas como um sistema de comunicação para interconectar pelo menos dois dispositivos de forma analógica ou digital com a finalidade de transmitir informações. Mas, com o avanço da tecnologia de comunicação e as normas de segurança industrial, o conceito de redes industriais mudou, até o ponto de que na atualidade são conhecidas como um sistema bidirecional utilizado para a interconexão de múltiplos instrumentos e dispositivos de monitoramento, controle e automação, que podem ser acessados individualmente, utilizando mensagens padronizadas por um protocolo (Dugan e Granaghan, 2011).

Uma questão chave relativa à implantação das FANs no sistema elétrico é se essa inteligência deve ser implementada em uma arquitetura centralizada ou distribuída. O termo centralizado implica que a aplicação reside em um local central, tal como um centro de controle. Uma arquitetura distribuída é aquela em que a aplicação reside em uma subestação ou sobre os alimentadores (fora do contorno da subestação), ou algum outro campo.

A disponibilidade de novos e poderosos meios de comunicação fornece bastante flexibilidade para definir se a solução deve ser centralizada ou distribuída. Por outro lado, o tipo de arquitetura escolhido tem um grande impacto sobre o desenho e nível de eficiência dos meios de comunicação e sobre os custos relacionados, e a escolha da arquitetura passa a depender de diversos fatores tais como: proteção e segurança, requisitos de latência, grau de flexibilidade do sistema, questões de orçamento e número de equipamentos interconectados. Os principais fatores são o nível de complexidade e cálculos necessários para tomar uma decisão de controle e os requisitos de latência necessários para executar a ação.

As decisões que são tomadas em função de um grande número de parâmetros requerem que as diversas medições e sensoriamento sejam encaminhadas a uma central de controle munida de adequadas ferramentas de *software*, com algoritmos que executem os cálculos e tomem as decisões de atuação em função das diversas informações advindas de vários dispositivos espalhados pela rede. Nestes casos uma arquitetura centralizada apresenta melhores desempenhos que uma arquitetura distribuída. Por outro lado, aquelas ações que requerem estritos requisitos de latência são melhor atendidas por controladores locais colocados perto dos dispositivos de atuação, nos quais se evita a utilização de meios de comunicação de longa distância e vários nós que retardam o tempo de resposta do sistema e, conseqüentemente, a arquitetura distribuída apresenta melhores desempenhos (Grenard, 2011).

Uma arquitetura distribuída também é preferida em aplicações onde somente um número limitado de processos é automatizado. Por exemplo, em determinadas ocasiões pode-se optar por realizar localização de falhas e restauração automática de serviços somente sobre regiões o setores que sofrerem frequentes interrupções de serviços e contam com baixos índices de confiabilidade.

Na arquitetura de controle centralizada a maioria das aplicações lógicas residem em um centro de controle com grande capacidade de processamento e decisão, que se encontra a uma determinada distância dos dispositivos a serem controlados mediante equipamentos de atuação sem capacidade de decisão (Bouhafs et al., 2012).

A principal diferença entre essa e as outras arquiteturas é que um único controlador é responsável pela realização de todas as tarefas referentes ao monitoramento, processamento de informações, decisões de controle e verificação do estado de todos os recursos do sistema. A presença de um equipamento central de controle diminui os problemas de interoperabilidade e a necessidade de utilização de protocolos de comunicação complexos.

Outras razões apontadas para a utilização de controle centralizado são: a vantagem do armazenamento central, a disponibilidade de dados globais e o uso de controladores de máquina sem necessidade de capacidade de decisão. Entretanto, a utilização da estrutura centralizada resulta em sistemas com baixa tolerância a falhas e com escassa facilidade de modificação e extensão do sistema de controle, que ficam limitadas às capacidades do controlador central.

Considerando que alguns padrões de comunicação estão sendo desenvolvidos pelos fabricantes de dispositivos de automação, o controle centralizado dentro dos centros de trabalho pode dar lugar a outras formas de conectividade entre os dispositivos, embora o papel central do controlador ainda possa permanecer.

Os sistemas de controle aplicados a *Smart  $\mu$ Grid* tendem a se tornar complexos, com um grande número de variáveis, ações e instrumentos interconectados o que reflete em uma imensa quantidade de dados a serem processados.

Um adequado EMCS, implementado mediante filosofia *Smart Grid*, requer de ações executadas em tempo real e sistemas confiáveis, com maior simplicidade para atender estes requisitos. Assim, uma solução atrativa é fracionar o sistema em partes menores, elaborando um sistema de controle distribuído que leve a maior facilidade de desenvolvimento, operação e administração, além do aumento da confiabilidade do sistema como um todo (o mal funcionamento de uma parte não implica, necessariamente, no mal funcionamento de todo o sistema) e simplificar a manutenção, dentre outras vantagens (Turner e Doty, 2006).

A arquitetura distribuída pode ser implementada por meio da inteligência disponível em dispositivos autônomos IEDs. Tais arquiteturas podem ou não estar incorporadas dentro de uma FAN, devido a que os IEDs podem operar de forma independente, formando arquiteturas distribuídas nos controladores, ou então podem se comunicar com outros dispositivos e trocar sinais locais de controle e informações de medição formando parte de uma FAN (Aguirre, 2007).

Os IEDs são dotados de alguma capacidade de processamento, o que, aliado à conexão dos dispositivos em rede (*Fieldbus*), pode levar a uma solução em que os próprios dispositivos troquem mensagens entre si e as ações do sistema de controle são executadas já não mais por um elemento centralizador, mas sim pela rede de dispositivos de campo, pela qual trafegam dados no formato digital submetidos ao protocolo de comunicação que está sendo utilizado.

Também é possível criar arquiteturas mistas, que representa uma abordagem intermediária entre arquiteturas centralizadas e totalmente distribuídas. Aqui a função do sistema central é coordenar ações locais para garantir a segurança de operação e controle sob qualquer circunstância, evitando restrições na arquitetura de distribuição. Essa alternativa melhora significativamente a gestão global dos recursos, apresentando tanto as vantagens da arquitetura centralizada quanto da arquitetura distribuída (Bouhafs et al., 2012).

O equipamento centralizador tem como função a supervisão e configuração do sistema de controle, e não mais a responsabilidade de executar todas as ações de controle, as quais podem, em parte, estar distribuídas nos dispositivos inteligentes de campo.

Com o objetivo de flexibilizar a arquitetura mista e atender de forma mais rápida e eficiente os requisitos de controle de uma *Smart Grid*, os protocolos de comunicação deverão propiciar a troca de dados entre os diversos controladores distribuídos e o controlador central mediante uma comunicação vertical, a qual permite ainda o envio de mensagens globais tipo *broadcast* (desde o controlador central para todos os controladores distribuídos) e mensagens *multicast* (desde o controlador central para um conjunto de controladores distribuídos). Estas mensagens globais permitem diminuir o tráfego na rede e, conseqüentemente, o tempo de resposta do sistema (Stallings, 2004, Booba et al., 2012). Por outro lado, também deve ser possível a troca de dados entre os diversos controladores distribuídos em uma comunicação horizontal, na qual o controlador central não participa, evitando os retardos que ocorrem nos diversos nós da rede (Mohagheghi et al., 2011; Bouhafs et al., 2012).

Outra vantagem das arquiteturas mistas é a facilidade de implementar um sistema de controle, supervisão e aquisição de dados ou SCADA. Um sistema SCADA age como provedor das informações do processo produtivo a diversos usuários de uma organização, como, por exemplo, informações de consumo para o pessoal da contabilidade, informações de falhas e estados de equipamentos para o pessoal de manutenção, informações de índices de produção para o pessoal de controle de qualidade (Hull et al., 2012).

Os sistemas SCADA ainda permitem programar a gravação de registros (alarmes ou qualquer outro evento que venha a ocorrer) em bancos de dados, emitir sons de alerta, mensagens, mudança de cores, envio de mensagens por celular e por e-mail, proporcionando um alto nível de interface com o usuário, por meio da qual pode informar-se e intervir no sistema de controle e automação.

Em uma arquitetura mista as FANs se formam a partir da interconexão de diversos segmentos de rede que podem ser classificados de diversas maneiras. A continuação serão descritas três classificações:

- Pirâmide de área de aplicação focada a tempos de resposta e aplicações;
- As redes *Field-Host* orientadas exclusivamente nas aplicações;
- Segundo o tipo de *bus* focado à capacidade das redes.

### **Pirâmide de área de Aplicação e Automação**

A pirâmide de área de aplicação e automação (Figura 3.3) classifica as FANs considerando duas características principais: os tempos de resposta e os níveis de automação da planta desde as redes gerenciais até os dispositivos de campo. A pirâmide de aplicação e automação consta de três pilares (Huang et al., 2004; Aguirre, 2007; Nogueira, 2009; Yorio, 2008):

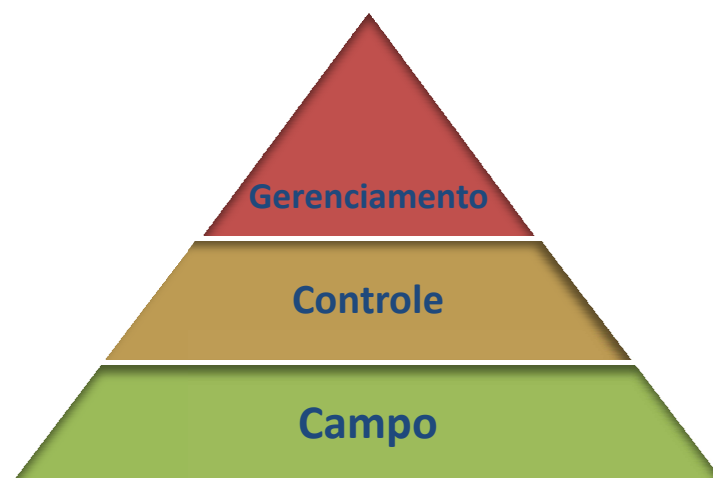


Figura 3.3: Pirâmide de Área de Aplicação e Automatização. Fonte: Yorio (2008).

- Rede de campo (*fieldbus Network*<sup>4</sup>): localizam-se na base da pirâmide. Sua função é conectar todos os dispositivos de campo, desde os que requerem alimentação por *bus* para serem usados em ambientes perigosos, tais como alguns transmissores, até dispositivos complexos, como analisadores e unidades remotas. As redes de campo e os protocolos mais conhecidos incluem: *FOUNDATION fieldbus*, *PROFIBUS* (PA e DP), *DeviceNet*, *Hart*, *Modbus RTU Seriplex*, *InterbusAS*, *lonWorks* e *ASAInterface*.
- Redes de controle e LAN (*Control System and Local Area Networks*): estão localizadas no meio da pirâmide e têm como função interconectar os dispositivos para controle e monitoramento da planta, tais como CLPs, computadores industriais, HMI, entre outros. As redes de controle e os protocolos utilizados mais conhecidos incluem: *Profibus FMS*, *ControlNet*, *FOUNDATION fieldbus* (HSE) e *Modbus TCP*.
- Redes de gerenciamento (*Plant-Wide Networks*): situadas no topo da pirâmide, têm como objetivo principal obter os dados dos dispositivos de controle e de campo aos níveis gerenciais da planta para análise e tomada de decisões globais. Também podem exercer ações de controle diretas sobre a planta, ainda que em teoria não estejam desenhadas para tais objetivos. A rede de gerenciamento mais conhecida é a rede Ethernet, consolidada como norma industrial. Muitos dos fabricantes têm optado por modificar o criar protocolos que implementam em seus equipamentos características para comunicar-se sobre essa rede, por esse motivo existe um grande número de equipamentos de controle e monitoramento que se comunicam através de Ethernet. Por isso é importante classificar as redes industriais em *Redes Field and Host*.

## Redes Field and Host

*Fiel and Host* é uma classificação simplificada das FANs, segundo as necessidades de aplicações de cada um dos dispositivos presentes no sistema de monitoramento, controle e automação da planta. Uma imagem que contem um esquema típico de conexão que permite diferenciar as redes de nível *Host* com as de nível *Field* é mostrada na Figura 3.4.

O Nível *Field*, Nível de Campo, compreende todos aqueles dispositivos que possuem aplicações específicas, tais como válvulas, alguns transmissores e em geral dispositivos finais de controle. Os protocolos dominantes para instrumentos de processos no nível de campo incluem: *HART*, *FOUNDATION Fieldbus* H1 e *PROFIBUS* PA. Essas redes foram projetadas considerando que o comprimento dos cabos de transmissão devem ser suficientemente longos para abarcar a maior quantidade de dispositivos possíveis e poder levar a informação desde esse nível até as salas de controle.

---

<sup>4</sup> *fieldbus* não deve confundisse com *Fieldbus* em inglês com “F” maiúsculo ao inicio, já que o último engloba todas as redes de automação industrial (FAN).

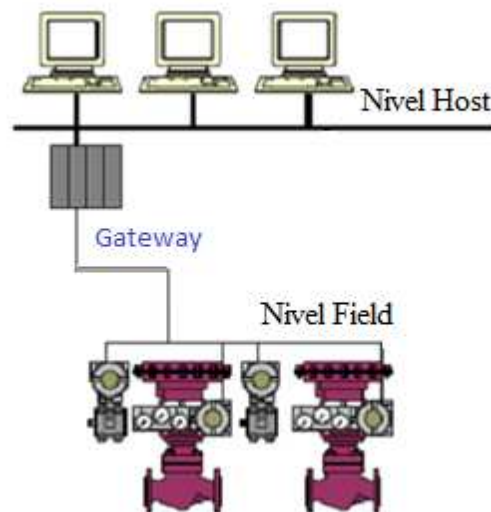


Figura 3.4: Esquema Típico de Conexão para Redes Field-Host. Fonte: Aguirre (2007).

O *Nível Host*, *Nível de servidor*, abrange os dispositivos que não pertencem ao nível de campo. Possuem aplicações variadas, como estações de trabalho, HMI e dispositivos de monitoramento, CLPs e dispositivos de enlace (*gateway*). Neste nível as redes baseadas em cabeamento ethernet são os padrões dominantes na indústria.

O desenvolvimento e a expansão das redes de campo possibilitam o gerenciamento de uma grande quantidade de informação proveniente dos diversos dispositivos de campo. Diferentemente das redes proprietárias, as redes baseadas em Ethernet são cada vez mais utilizadas nos sistemas de monitoramento e controle, devido a sua capacidade de manipular toda essa informação com alta velocidade.

## Tipos de Barramentos

A classificação por tipo de bus é a forma mais comum de caracterizar as redes de automação industrial na atualidade. Podem ser diferenciados quatro buses orientados à automação industrial: SensorBus, DeviceBus, FieldBus e ControlBus. Uma comparação entre os tipos de buses, segundo a funcionalidade e tipo de dados, é mostrada na Figura 3.5.

O SensorBus interconecta grande numero de sensores, transdutores de variáveis físicas, atuadores, acionadores com um controlador central. Suas características principais são:

- A informação é transmitida em bit;
- Aplicações discretas: todas as variáveis são digitais;
- O tempo de resposta é menor que 5ms.

Os *SensorBus* mais conhecidos são: AS-i, *Seriplex*, *Interbus-S*.

O *DeviceBus* (Bus de dispositivos) faz a conexão de dispositivos com saídas em nível de byte, como controladores básicos. Suas principais características são:

- Informação transmitida em byte;
- Aplicações discretas: maioria das variáveis são digitais, ainda que algumas são analógicas;
- Os controladores típicos são CLPs e PCs;
- O tempo de resposta é menor que 5 ms.

Entre os *DeviceBus* mais conhecidos podem ser mencionados: *Device-Net*, *Profibus DP* e *CAN*.

O *fieldbus* (bus de campo) interliga dispositivos mais complexos que transmitem dados em pacotes de bytes, como controladores básicos e computadores. Suas principais características são:

- A informação é transmitida em palavras;
- Aplicações orientadas a processos: a maioria das variáveis são analógicas ainda que também suportem as digitais;
- O controle típico é distribuído;
- Sua função principal é repartir a informação.

Os *fieldbus* mais conhecidos são: Foundation Fieldbus, Profibus PA e LonWorks.

O *ControlBus* (Bus de Controle) é semelhante ao *fieldbus*, porém com a particularidade de possuir maior capacidade de gerenciamento de pacotes e realização de controle. Os *controlBus* mais conhecidos incluem: *Modbus+*, *Profibus FMS*, *Data Highway + (DH+)* e *ControlNet*.

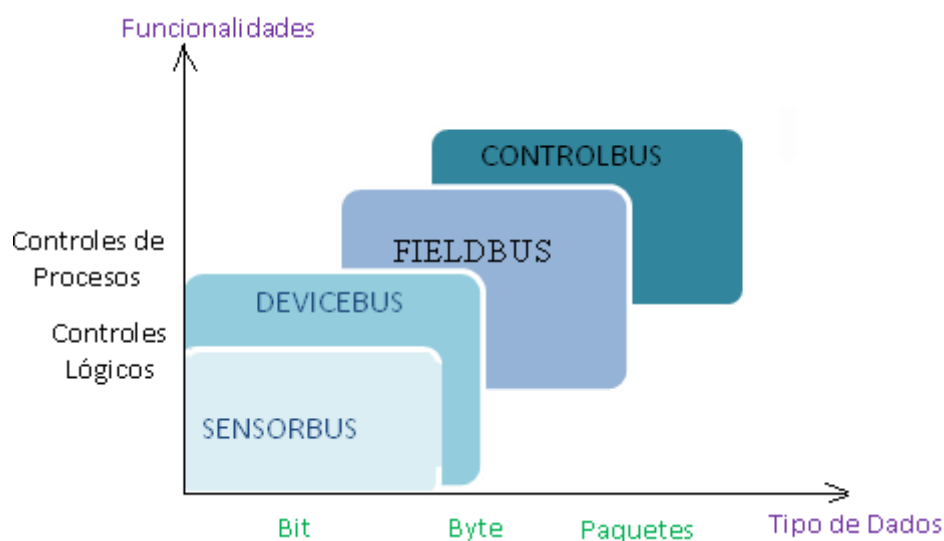


Figura 3.5: Comparação de Redes Segundo Funcionalidade e Tipo de Buses. Fonte: Yorrio (2008).

### 3.5 Sistemas de comunicação

O sistema de comunicação está composto por componentes de hardware e software com o objetivo de levar informações de um ponto a outro no menor tempo possível e com a máxima segurança.

Um dos modos de transmissão de dados é o sistema serial, que é o modo mais comum de transmissão, no qual os bits de informação são enviados sequencialmente em um único canal de dados. Dentre esses modos os mais comuns são o RS-232 e o RS-485 (Gomes, 2003).

Existe a possibilidade de serem realizadas várias conversões e reconversões entre RS-232, RS-485 e ethernet, e entre sinais elétricos e ópticos, porém quanto mais conversões maiores serão os custos do sistema, bem como mais vulnerável a falhas.

O RS-232 é limitado quanto à distância e não forma rede com componentes interligados; é a interface mais comumente utilizada, sendo ideal para a faixa de transmissão de dados de 0 a 20 kbps e 15,2 m. Já a RS-485 pode ser utilizada em aplicações multiponto, nas quais um computador central controla diversos dispositivos diferentes ligados entre si, formando uma rede. As transmissões podem ir a longas distâncias e altas velocidades. Essa rede possibilita a conexão dos equipamentos da rede, observado o limite de ligação total do circuito, entre eles a distância máxima de 1200 metros, o que pode inviabilizar sua formação em caso de pontos de monitoração muito distantes entre si (Carvajal e Pérez, 2008).

#### 3.5.1 Protocolos de comunicação

Para que todos os dispositivos de automação presentes na FAN possam comunicar-se entre si e com o sistema central de gerenciamento de dados, além de, no mínimo, um meio de comunicação, deverá existir um protocolo de comunicação que consiste em um conjunto de regras que regule a transferência de dados entre os diversos dispositivos.

Uma arquitetura de protocolos é uma estrutura em camadas de elementos hardware e software, que facilita a transferência de dados entre sistemas e possibilita aplicações distribuídas como a transferência de arquivos. Para que um dispositivo transmissor possa enviar dados a um receptor deve haver um caminho entre ambos, porém também se requer de outras tarefas adicionais. Por exemplo, o sistema transmissor deve identificar o receptor desejado, além, disso deve assegurar-se que o destino está preparado para receber dados e, ainda, se os formatos de arquivos são diferentes entre transmissor e receptor um dos dois necessitará de um dispositivo que faça a tradução. Transmissor e receptor devem também acordar um método para corrigir perdas de informações, realizar controle de fluxo e encaminhamento de pacotes, dentre outros desempenhos de comunicação (Stallings, 2004).

Nos sistemas de automação industrial existem protocolos orientados a bits, a bytes e a caráter. Geralmente os protocolos estão baseados no modelo OSI (International

Standardization Organization) de sete camadas (Figura 3.6). Alguns utilizam mais ou menos camadas segundo a aplicação. Assim, por exemplo, as mensagens GOOSE definidas por a norma IEC 61850 com o fim de serem mais rápidas utilizam unicamente as camadas um e dois do modelo OSI, não requerendo sinais de confirmação (Mohagheghi et al., 2011).

Em uma arquitetura de protocolos cada camada se dispõe formando uma pilha vertical. Cada camada da pilha realiza um subconjunto de tarefas relacionadas entre si, necessárias para comunicar com o outro sistema. Geralmente as funções mais básicas são atribuídas à camada imediatamente inferior. Ainda cada camada proporciona um conjunto de serviços para a camada superior. Idealmente as camadas deveriam estar definidas de forma tal que mudanças realizadas em uma não requeiram mudanças nas demais (Stallings, 2004).

### **Camada Física**

A camada física diz respeito aos meios de conexão através dos quais irão trafegar os dados.

### **Camada de Enlace ou Ligação de Dados**

A camada de ligação de dados ou camada de enlace detecta e, opcionalmente, corrige erros que possam acontecer no nível físico. É responsável pela transmissão e recepção de tramas e pelo controle erros e de fluxo e pela sincronização entre receptor e transmissor.

### **Camada de Rede**

A camada de rede é responsável pelo endereçamento dos pacotes de rede, associando endereços lógicos (IP) em endereços físicos (MAC), de forma que os pacotes de rede consigam chegar corretamente ao destino. Essa camada também determina a rota que os pacotes irão seguir para atingir o destino, baseada em fatores como condições de tráfego da rede e prioridades. As rotas podem ser determinadas por tabelas estáticas, no início de cada conversação, ou altamente dinâmicas.



Figura 3.6: Modelo de Referência OSI Para Protocolos de Comunicação. Fonte: Stallings (2004).

Essa camada é usada quando a rede possui mais de um segmento e, com isso, há mais de um caminho para um pacote de dados percorrer da origem ao destino.

### **Camada de Transporte**

A camada de transporte proporciona uma transferência transparente e confiável de dados entre receptor e transmissor, e ainda proporciona os procedimentos para recuperação de erros e controle de fluxo origem-destino. Tipicamente enviando para o transmissor uma informação de recebimento, informando que o pacote foi recebido com sucesso.

### **Camada de Sessão**

A camada de sessão permite que duas aplicações em equipamentos diferentes estabeleçam uma sessão de comunicação. Nesta sessão, essas aplicações definem como será feita a transmissão de dados e coloca marcações nos dados a ser transmitidos. Se a rede falhar os dispositivos reiniciam a transmissão dos dados a partir da última marcação recebida pelo receptor.

Disponibilizam serviços como pontos de controles periódicos a partir dos quais a comunicação pode ser restabelecida em caso de inconvenientes na rede.

### **Camada de Apresentação**

A camada de apresentação, também chamada camada de Tradução, converte o formato do dado recebido pela camada de aplicação em um formato comum a ser usado na transmissão desse dado, ou seja, um formato entendido pelo protocolo usado.

### **Camada de Aplicação**

A camada de aplicação corresponde às aplicações (programas) no topo da camada OSI que serão utilizadas para promover uma interação entre o equipamento destinatário e o usuário da aplicação.

## **3.5.2 Meios Físicos de Comunicação**

Para que a comunicação aconteça entre dois dispositivos é necessário existir um meio de contato entre eles. Embora a maioria dos sistemas de comandos digitais dependa de conexões complexas entre dispositivos, por meio de fios, existem tecnologias alternativas que podem ser usadas para simplificar as instalações, como as tecnologias sem fios (Aguirre, 2007; Hull et al., 2012) e a tecnologia PLC, que utiliza o sistema de fiação das instalações de energia elétrica como meio de comunicação entre os dispositivos, sendo mais simples e de menor custo, porém mais lento e menos confiável.

O meio físico pode ser fio de cobre ou fibra ótica. Nos cabos de cobre o sinal é transmitido com um impulso elétrico. Este tipo de cabo pode ser do tipo coaxial ou par trançado, sendo o par trançado o mais comum em aplicações de EMCS (Tunner e Doty, 2006).

No caso da fibra ótica o sinal é conduzido como impulsos luminosos (Stallings, 2004). Normalmente os ambientes industriais estão sujeitos a ruídos, neste caso é recomendada a utilização do par trançado tipo STP que conta com recobrimento metálico, ou então, em casos mais extremos, a fibra ótica, que é imune a ruídos eletromagnéticos dado que transmite um sinal de luz em vez de um sinal elétrico (Stallings, 2004; Carvajal e Péres, 2008).

## **Fibra Ótica**

Devido ao desejo de dispor de uma capacidade de transmissão de dados ultrarrápida nas aplicações de redes de computadores, cada vez mais estão sendo usados sistemas de comunicação por meio de redes com fibras ópticas. Essas redes possuem uma largura de banda suficiente para atender simultaneamente as aplicações de telefonia, informática e comunicação dos sistemas EMCS, possuindo maiores velocidades de transmissão de dados (Turner e Doty, 2006).

As vantagens são:

- Grande largura de banda e elevada capacidade de transmissão;
- Matéria prima abundante (areia);
- Imune a ruídos elétricos e interferências atmosféricas;
- Não existe o fenômeno de diafonia (crosstalk);
- Baixas perdas e menor necessidade de estações repetidoras;
- Não há radiação eletromagnética, trazendo maior segurança da informação dado que não se podem captar dados desde o exterior da fibra;
- Pouco peso e tamanho.

Por outro lado suas desvantagens são:

- São muito delicadas, requerem de tratamentos especiais durante a instalação e a manutenção;
- Requerem de complexos processos para a purificação da matéria prima.
- Curta vida dos emissores laser;
- Maior custo que outros meios guiados e maior necessidade de tecnologias adicionais, como conversores ópticos elétricos e elétricos ópticos, conectores etc.;
- Maior vulnerabilidade a ataques de roedores.

Segundo as características construtivas as fibras ópticas podem ser monomodos e multimodos. As fibras monomodos sofrem menor atenuação e distorção de sinal que as fibras multimodos, portanto são aplicadas em comunicação a longas distâncias (Stallings, 2004).

## **Par Traçado**

O par trançado é formado de dois fios de cobre trançados entre si com a finalidade de reduzir o efeito de interferências elétricas. Normalmente são encapsulados vários pares em um

mesmo cabo, com passos de trançado diferentes para cada par adjacente. Os pares trançados são utilizados tanto para a transmissão de sinais analógicos como digitais.

Com o objetivo de adaptar-se a diferentes cenários industriais, existem diversos tipos de par trançado, alguns com recobrimento metálico para adaptar-se a ambientes ruidosos, conforme descrito a seguir:

UTP (*unshielded twisted pair*). O par UTP ilustrado na Figura 3.7, consta de quatro pares trançados e são muito sensíveis a interferências. A norma EIA/TIA 568 divide os cabos de par trançado UTP em três subcategorias.

- UTP tipo 3: Consiste em cabos desenhados para frequências de até 16MHz. Velocidade de até 16 Mbps.
- UTP tipo 4: Consiste em cabos desenhados para frequências de até 20MHz. Velocidade de até 20 Mbps.
- UTP tipo 5: Consiste em cabos desenhados para frequências de até 100MHz. Velocidade de até 100 Mbps.

Os pares tipo 3 e tipo 5 são os mais utilizados em aplicações LAN. O tipo 3 corresponde a cabos de qualidade telefônica. O tipo 5 tem melhores característica de transmissão de dados e vem sendo utilizando cada vez mais. A principal diferença entre o tipo 3 e o tipo 5 é a distância do trançado, sendo no tipo 5 de 0.6 a 0.85 cm e no tipo 3 de 7.5 a 10 cm. O tipo 5 é obviamente mais caro, mas tem melhores características que o tipo 3.

FTP (*Foiled Twisted Pair*). O par FTP ilustrado na Figura 3.8, consta de quatro pares trançados com um recobrimento metálico que garante proteções frente a interferências eletromagnéticas.

STP (*Shielded Twisted Pair*). O par STP consta de dois pares, cada par é envolto em uma malha metálica, e o conjunto é recoberto com outra malha, o que o torna mais robusto a interferências eletromagnéticas.

## Cabo Coaxial

O cabo coaxial, similarmente ao par trançado, tem dois condutores, mas está constituído de forma diferente para poder operar sobre uma taxa maior de frequências. Consiste de um condutor cilíndrico externo que envolve a um cabo condutor. Entre eles há um material não condutor, como ilustra a Figura 3.9. Devido a sua estrutura, o cabo coaxial é menos vulnerável a interferências que o par trançado e é usado para a transmissão de dados de alta velocidade, devido à tolerância aos ruídos dada pela malha de proteção destes cabos, sobre distâncias de alguns quilômetros, estando amplamente disponível, relativamente barato e capaz de ser instalado e mantido facilmente.

Existem dois tipos de cabos:

- 75 Ohms: sobretudo para aplicações de sinais analógicos;
- 50 Ohms: para utilização em redes Ethernet.

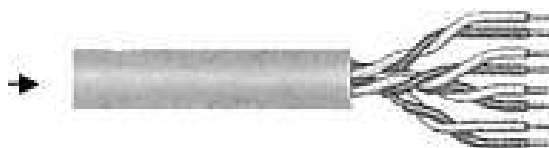


Figura 3.7: Par Trançado Tipo UTP.



Figura 3.8: Par Trançado Tipo FTP.

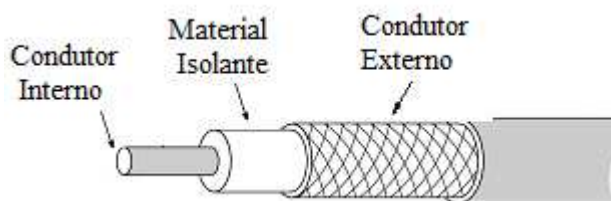


Figura 3.9: Cabo Coaxial.

Suas principais limitações são a atenuação, o ruído térmico e o ruído de intermodulação, esse último aparece somente quando são usados simultaneamente vários canais (FDM) ou bandas de frequências sobre o mesmo cabo.

Para a transmissão de sinais analógicos precisam-se amplificadores, separados entre si por distâncias da ordem de poucos quilômetros, podendo estar mais separados quanto maior for a frequência de trabalho. Enquanto que para transmissão de sinais digitais precisam-se amplificadores separados por uma distância de aproximadamente 1 km, dependendo da velocidade de transmissão.

## Power Line Communications - PLC

A tecnologia PLC consiste em utilizar a fiação da rede elétrica para transmitir dados, fazendo com que a rede de distribuição se comporte como uma rede de dados onde cada tomada elétrica é um ponto de conexão à rede. A recepção e transmissão dos dados são realizadas mediante um modem que é conectado à rede elétrica. Segundo Murillo e Fonseca (2009), a tecnologia PLC fornece um adequado desempenho em aplicações de monitoramento de uma LAN.

PLC não é uma tecnologia nova, ela já vem sendo utilizada desde os anos 30 do século passado em redes de alta tensão e vem sendo inovada ao longo dos anos (Silva, 2007). Na década de 80 as comunicações de PLC operavam em até 144Kbps e com frequências de até

500 KHz. Na década de 90 a tecnologia teve um avanço bastante significativo atingindo 10Mbps. No início deste século chegou-se aos 45Mbps, operando agora com frequências bem mais elevadas, de até 30MHz (Murillo e Fonseca, 2009).

A tecnologia PLC diminui custos e simplifica muito as instalações, conseguindo atualmente taxas de transferência de até 224Mbps, sendo estas velocidades de pico, considerando ambientes ideais de transmissão, podendo cair muito dependendo do ambiente em que esteja operando. O principal motivo deste inconveniente é que os sistemas de distribuição de energia elétrica não foram projetados para serem utilizados como canais de comunicação e as características dos circuitos de média tensão, na faixa das frequências PLC, são influenciadas principalmente pela impedância dos fios, dependente das características intrínsecas dos condutores, tais como: conformação de capas dos cabos, longitudes e diâmetros e ainda da topologia da rede elétrica e as reflexões devido à inserção e retirada dinâmica de cargas na rede elétrica (Silva e Pacheco, 2008).

Assim, as principais limitações da tecnologia PLC ocorrem porque:

- Interconexões e ramificações da fiação elétrica representam uma mudança de meio físico e conseqüentemente perdas por atenuação para o meio de transmissão de dados (Murillo e Fonseca, 2009);
- As redes elétricas são muito suscetíveis a ruídos. Existem inúmeras fontes que podem gerar estes ruídos, algumas com menos e outras com mais intensidade, desde um simples reator eletrônico de lâmpadas fluorescentes, inversores de frequência, motores elétricos, fontes chaveadas etc.;
- Os fios elétricos se comportam como filtros indutivos capacitivos, tipo passa baixa e, dependendo do condutor, a banda útil fica limitada bem abaixo dos 30MHz (Murillo e Fonseca, 2009);
- O PLC opera com frequências bastante altas e estas frequências sobrepostas a um condutor elétrico são capazes de gerar sinais de radiofrequência, capazes de ocasionar interferência em outros equipamentos eletrônicos de radiocomunicação.

A teoria de comunicações mostra que as máximas transferências de energia, realizada em um canal de comunicação, ocorrem quando a impedância característica do canal seja igual à impedância do equipamento transmissor e a do equipamento receptor. Caso contrário ocorre reflexões do sinal transmitido e pode causar grandes atenuações em determinadas frequências (Stallings, 2004). Torna-se difícil conseguir uma adequada transmissão de dados nestes cenários presentes na rede de distribuição, onde uma simples manobra de um dispositivo de proteção altera a impedância do canal e podem ocasionar perdas de comunicação entre os equipamentos interconectados. No entanto, estes fenômenos geralmente são de curta duração e é possível desenvolver técnicas para conseguir uma transmissão de dados regularmente aceitável.

Para contornar estes problemas, muitas técnicas foram desenvolvidas e continuam sendo melhoradas, como técnicas de modulação, protocolos de comunicação e filtros, as quais são amplamente utilizadas para a utilização da tecnologia PLC.

Para evitar erros de transmissão pode-se utilizar codificação para correção de erro, permitindo desse modo a correção de erros de transmissão no lado da recepção. Um código de relação 1:2 é usado, implicando que os dados transmitidos estão duplicados, isto é, para cada bit de dados o sistema PLC transmite dois bits no canal correspondente. Os equipamentos PLC também monitoram automaticamente a qualidade do canal, de modo que se ela for alta o suficiente essa correção de erro é desativada e, conseqüentemente, a capacidade do canal é duplicada. Também são utilizados repetidores entre transmissor e receptor a fim de superar os problemas de atenuação do sinal transmitido (Arzuaga et al., 2011).

Para minimizar as distorções introduzidas pelo canal PLC e conseguir um bom desempenho, é preciso implementar processos de codificação que garantam uma redução de erros para o código usado. Assim a transmissão de dados em banda larga passa a ser conveniente e possível a partir da utilização de frequências mais altas, tipicamente entre 1,6 MHz a 30 MHz. Entre estas técnicas de modulação podem ser citadas:

- OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing); e
- Modulação FSK (chave de deslocamento de frequência).

O método de modulação de sinais OFDM, deixa os sinais viajarem ao redor do ruído presente nas linhas elétricas. É uma técnica de modulação onde existe um número amplo de frequências subportadoras, as quais são transmitidas simultaneamente, oferecendo desta maneira grande adaptabilidade ao sistema, pois é possível suprimir portadoras interferentes ou interferidas ou variar o carregamento (número de bits) de cada portadora de acordo com a relação sinal/ruído ou atenuação do enlace. Permite obter altas velocidades de canal por serem mais imunes às interferências desse tipo de canal.

A modulação por chaveamento de frequência (FSK) consiste em modular os dados digitais transformando-os em um sinal analógico com dois valores diferentes de frequência, uma correspondente ao nível lógico zero e outra correspondente ao nível lógico um. A principal característica desta modulação é a boa imunidade a ruídos (Stallings, 2004; Faccioni et al., 2008).

### **3.5.3 Meios de Comunicação Sem Fio**

Na última década houve um crescimento exponencial das redes de comunicação sem fio. Vários padrões acomodam-se a uma vasta gama de aplicações das *Smart Grid*, principalmente visando ampliar a cobertura das redes ligadas por fios. Recentemente novas tecnologias sem fio vêm sendo desenvolvida pelo IEEE, em conjunto com a indústria.

Alguns dispositivos de automação, como medidores inteligentes e UTRs, estão munidos com capacidade de transmissão sem fio além da clássica transmissão por fio. Ainda há poucos dispositivos com estas características no mercado e alocar uma opção de conexão sem fio resulta em um substancial incremento do custo, tornando-se uma limitação importante para a conexão sem fio.

Além da simplificação do cabeamento e consequente redução de custos, as redes sem fio também oferecem outras grandes vantagens para a automação industrial em aplicações tais como:

- Sensores móveis;
- Máquinas girantes ou móveis;
- Acesso a instalações remotas;
- Acesso a instalações fixas em forma móvel utilizando celulares, notebooks e PDAs.

Entre os diversos padrões atuais existem aplicações para redes pessoais WPAN (*Wireless Personal Area Network*), como *Bluetooth* e IEEE 802.15; padrões para redes locais WLAN (*Wireless local Área Network*) como o 802.11 e padrões para área metropolitana WMAN (*Wireless Metropolitan Area Network*) como o IEEE 802.16 WiMax, GSM e GPRS. A Figura 3.10 ilustra as características quanto à velocidade de transmissão e alcance de vários padrões aplicados às *Smart Grids*.

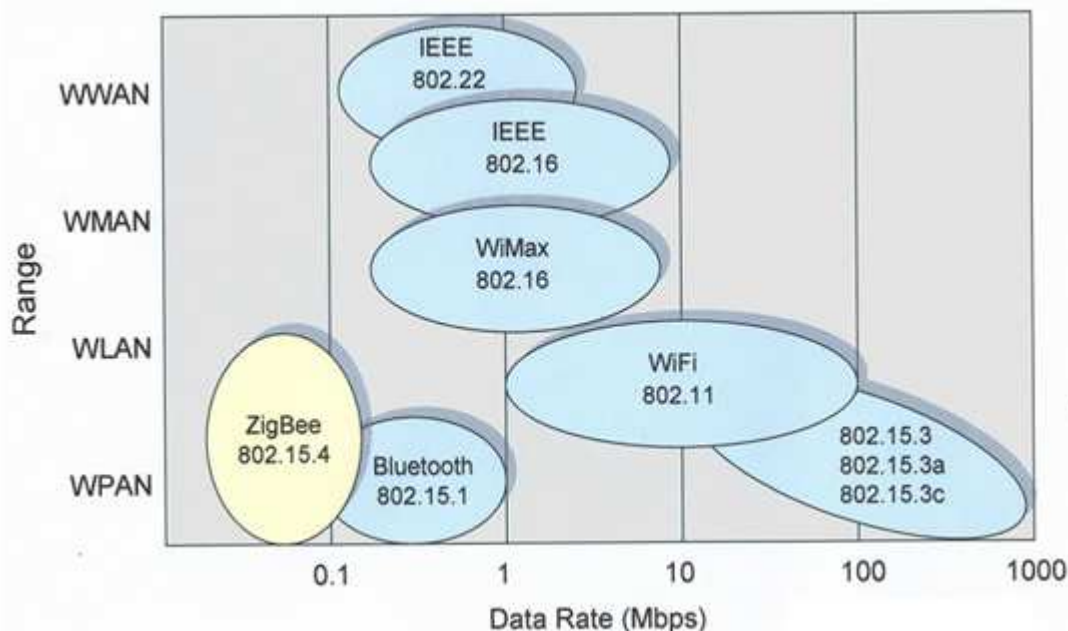


Figura 3.10: Comparação das Tecnologias Sem Fio quanto à Velocidade e Alcance. Fonte: Stoll (2008).

## Bluetooth

Bluetooth é uma rede sem fio baseada em um sistema de rádio projetado para prover comunicação em um pequeno alcance (WPAN), operando na banda de 2,4GHz, com velocidades de transmissão de até 1Mbps e capacidade de integração em rede de até oito dispositivos. Fatores interessantes para sua aplicação industrial são: baixo custo, facilidade de integração, alto nível de segurança e consumo mínimo de baterias. O lado negativo é seu baixo alcance de 10m a 100m. Está sendo incorporado Bluetooth em medidores, contadores e interfaces de programação.

## Padrão 802.15.4 (ZigBee)

O padrão IEEE 802.15.4 (ZigBee) é um conjunto de especificações que define tanto o protocolo quanto o comportamento da comunicação entre dispositivos dentro de uma WPAN com maior alcance que Bluetooth. O IEEE definiu a camada física e o controle de acesso ao meio (MAC). Em paralelo o ZigBee *Alliance* definiu as especificações para a camada de rede e aplicações, além de vários aspectos de segurança (Aguirre, 2007).

As especificações contidas neste padrão tornam seu emprego adequado em aplicações que requerem de confiança, segurança, autocorreção, suporte a grande número de nós, baixo custo e distâncias de transmissão de até 70m (Aguirre, 2007).

A tecnologia ZigBee ainda pode interagir com outras redes através de dispositivos de enlace e vários dispositivos móveis, como celulares e PDA, usando Wi-Fi (Han e Lim, 2010), tornando-se útil para determinadas aplicações no entorno de uma *Smart  $\mu$ Grid*. Capaz de integrar informações físicas diversificadas como detecção e controle de vários dispositivos consumidores, mediante redes conformadas por nós de sensores e nós atuadores, fornecendo uma adequada prestação em sistemas de gestão da energia e colaborando ainda para a mudança de hábitos por parte dos usuários para apoiar o conforto e serviços mais inteligentes (Han e Lim, 2010). Cada nó ZigBee deve ter protocolo de roteamento multicaminho para estabelecer automaticamente a rede sem fio entre os nós inteligentes, de modo tal que no momento de transmitir informações os nós possam conhecer o caminho mais adequado para chegar ao destino.

As redes ZigBee são constituídas de múltiplos tipos de tráfego com suas próprias características, incluindo dados periódicos, dados intermitentes e dados repetitivos de baixa latência e são utilizadas em aplicações tais como:

- Utilização de pequenos pacotes em grandes redes;
- Redes com vários dispositivos pouco utilizados;
- Necessidades de rápida inserção na rede.

Em uma rede ZigBee podem existir três tipos de dispositivos. O componente mais básico é o terminal Zigbee que, munido de capacidade de comunicação com outros nós da rede, realiza as interfaces da rede com outros terminais. O seguinte componente na hierarquia

é o Roteador ZigBee que, além de poder agir como dispositivo terminal, tem a capacidade de funcionar como roteador intermediário de retransmissão de sinais para outros nós. No topo da rede está o coordenador ZigBee que armazena as informações de segurança e endereços de todos os outros dispositivos de um segmento de rede e faz ponte para outras redes. Alguns dispositivos podem estar afastados do coordenador e não receber sinais confiáveis, neste caso os roteadores se encarregam de retransmitir a informação (Oliveira, 2010).

As transmissões e recepções ZigBee podem ser feitas através dos módulos XBee e XBee PRO, ilustrados na Figura 3.11. O XBee e o XBee PRO são perifericamente compatíveis entre si, porém com diferentes potências de transmissão, 1mW para o módulo XBee e 63 mW para o módulo XBee PRO. Para fazer a conexão do módulo XBee ou XBee PRO com um computador pode ser utilizado um adaptador USB com facilidade de conexão semelhante a um pendrive, como o ilustrado na Figura 3.12.

Os módulos XBee e XBee PRO possuem três opções de antenas disponíveis para enviar e receber dados: antenas do tipo monopólo, antenas do tipo dipolo e antenas do tipo chip. A antena do tipo chip possui uma direção de maior radiação e por isso requer que o módulo esteja orientado ao seu roteador. Além disso, existem três tipos de antena:

- Módulo com Antena integrada no chip;
- Módulo com um conector para antena externa;
- Módulo com antena vertical integrada tipo chicote.



Figura 3.11: Módulos XBee e XBee PRO com três opções de antena.

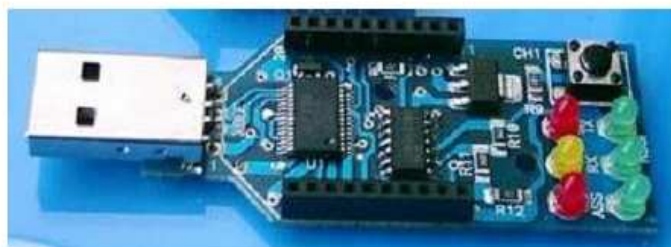


Figura 3.12: Adaptador/ conversor USB- XBee/Xbee PRO.

## Padrão IEEE 802.11 (Wi-Fi)

O padrão IEEE 802.11 Wi-Fi tem como objetivo prover conectividade sem fio para dispositivos móveis dentro de uma WLAN, como celulares e computadores portáteis. As velocidades de transmissão de dados variam entre 1 Mbps a 54 Mbps. Todos os padrões utilizam o protocolo CSMA/CA na subcamada de controle de acesso ao meio, na qual, quando um dispositivo móvel tem informações para transmitir, detecta primeiramente se há alguma estação transmitindo, se houver então a estação espera um tempo aleatório e torna a verificar a disponibilidade do meio para evitar colisões. Para a camada física existem varias técnicas de transmissão, dentre elas estão a DSSS (*Direct Sequencing Spread Spectrum*) utilizada pelo padrão 802.11b e OFDM utilizada pelos padrões 802.11a e 802.11g. Os padrões 802.11 utilizam a faixa de frequência de 2,4 GHz, excetuando-se o padrão 802.11a que utiliza a faixa entre 5 GHz e 6 GHz.

O padrão 802.11 define dois modos de operação:

- Modo de infraestrutura. Cada dispositivo utiliza um ponto de acesso para comunicar-se com a rede local, normalmente uma rede Ethernet. Podendo haver um único ponto de acesso com capacidade de suportar vários dispositivos, ou um conjunto de dois ou mais pontos de acesso conectados à mesma rede conformando um conjunto estendido de serviços. Dois pontos de acesso podem atuar como uma ponte, como se fosse um único segmento (Carvajal e Péres, 2008)
- Modo Ad Hoc ou ponto a ponto. Neste modo os dispositivos formam um conjunto independente básico de serviço, onde cada dispositivo pode atuar como roteador para outros dispositivos. Desta maneira a rede pode ser expandida pela simples presença de mais dispositivos.

As redes Wi-Fi possuem um alcance de até 100m e suas principais vantagens radicam na sua facilidade de configuração e implementação. A Figura 3.13 ilustra uma aplicação Wi-Fi em uma *Smart  $\mu$ Grid* com dois pontos de acesso ligados através de uma conexão tipo ponte, destinados ao monitoramento e controle de uma sub-rede remota. Para seu funcionamento correto requer um caminho sem obstáculos entre transmissor e receptor (Carvajal e Péres, 2008). Para ambientes onde isso não é possível pode-se recorrer ao padrão IEEE-802.16 (WiMax).

## Padrão IEEE 802.16a WIMAX

O padrão IEE 802.16 (WiMax), da mesma linha que a tecnologia Wi-fi, é uma tecnologia sem fio de rede metropolitana (WMAN), com suporte de cobertura na área de quilômetros e taxas de transmissão de até 74Mbps e pode funcionar como espinha (backbone) de outras tecnologias. Por exemplo, para implementar uma WLAN em um ambiente remoto pode-se utilizar WiMax como backbone de Wi-Fi.

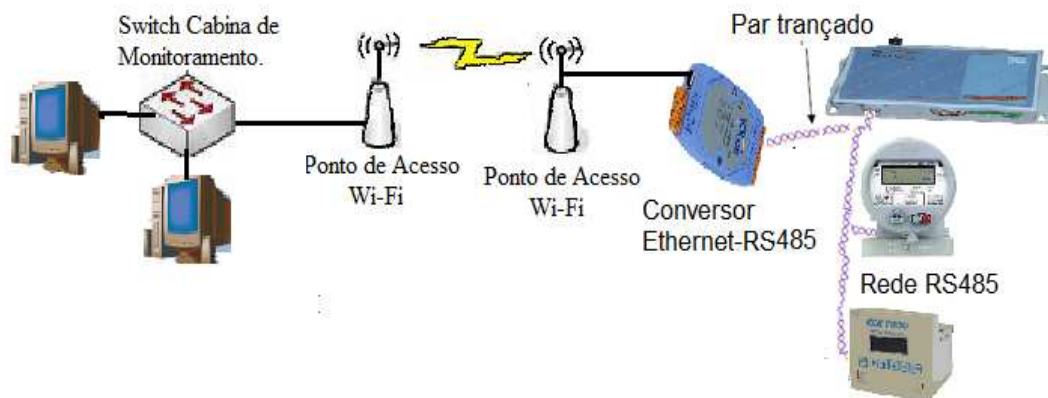


Figura 3.13: Exemplo de Aplicação Wi-Fi em uma *Smart micro Grid*.

A WiMax se mostra como uma boa alternativa de baixo custo para ambientes industriais de grande extensão. O padrão IEEE 802.16<sup>a</sup>, uma extensão do padrão IEEE 802.16, transmite nas bandas de 2 GHz a 11 GHz e constitui uma tecnologia apropriada para ambientes com muitos obstáculos, como árvores e edifícios.

### Comunicação Celular GSM/GPRS

O GSM é um meio de comunicação sem fio com cobertura de área ampla WWAN (*Wireless Wide Area Network*) e utiliza tecnologia digital e sistemas baseados em técnicas de acesso múltiplo TDMA (*Time Division Multiple Access*), prestando serviços de alta qualidade. Ainda que orientada à conversação e transmissão de voz, os modem GSM oferecem comunicação de dados, com uma comunicação ponto a ponto entre dispositivos. Possibilitam conexões virtuais entre o equipamento remoto e uma rede ethernet TCP/IP convencional e permitem a transferência de dados em tempo real, alarmes e arquivos, conforme os requisitos da automatização industrial (Munsuri et al., 2010).

A velocidade de transmissão está limitada a 1900kbps, porém existem técnicas para aumentar essa velocidade. Por exemplo, o GPRS (*General Packet Radio Service*) é um sistema de transmissão de dados empregado na rede de telefonia celular GSM que compartilha sua faixa de frequência. No entanto, é notavelmente mais rápido que o GSM. Em teoria apresenta velocidades de até 171,2Kbps e utiliza transmissão de dados por meio de pacotes. Levando em consideração que FIELDBUS FOUNDATIONS emprega 38.4 Kbps para seu bus de controle, a velocidade atual do GPRS é suficiente para comunicações com um ou vários instrumentos agrupados em uma rede sem fio.

O GPRS apresenta-se como uma alternativa muito boa para monitorar equipamentos remotos, em distâncias grandes, facilitando também a comunicação em longa distância entre um consumidor e um provedor de recursos energéticos, ou uma comunicação entre duas ou várias *Smart  $\mu$ Grids* distanciadas. Também pode ser utilizado para que um determinado

administrador receba informações da unidade consumidora desde seu aparelho móvel, como notebook ou celular. Suas principais características são:

- Uso da infraestrutura de comunicação de provedor de telefonia celular;
- Alcance limitado unicamente pela cobertura do provedor de serviço de celular;
- Apresenta custo atribuído pelo provedor de telefonia já que requer de uma linha de celular com serviços GPRS. Porém este custo quase sempre é significativamente inferior comparado com redes próprias de rádio.

No entanto, atualmente, ainda que possivelmente seja diferente em um futuro próximo, sua instalação requer:

- Equipamentos de automação com alguma capacidade de comunicação;
- Modem GPRS para aqueles equipamentos que não possuem capacidade de comunicação GPRS;
- Contrato com um operador de GPRS;
- Uma conta ativa com um contrato de serviço. O dispositivo deve estar aprovado para seu uso na rede do operador.
- Um destino para o envio e recepção de informações que pode ser outro dispositivo, uma direção IP em internet ou uma aplicação na rede.

### **3.5.4 Infraestrutura Automática de Medição - AMI**

Como mencionado anteriormente, para poder administrar os recursos energéticos é fundamental medir o maior número de variáveis e parâmetros possíveis, com a exatidão requerida. No entanto, nem sempre é fácil estabelecer uma ligação entre as ações do dia-a-dia e os seus reais impactos energéticos, para poder agir de maneira adequada.

As faturas de consumo de energia são tipicamente recebidas apenas com periodicidade mensal, sendo difícil distinguir os efeitos de ações individuais ou obter informações relevantes sobre a efetividade de alterações empreendidas.

Este cenário está mudando rapidamente com a introdução das chamadas tecnologias de medição inteligente de energia (*smart metering*), as quais possibilitam que os dados medidos possam ser transportados a um computador pessoal e ser apresentados graficamente em um formato facilmente compreensível, permitindo aos clientes a otimização instantânea na utilização de energia e a observação imediata dos resultados das suas ações.

Além do consumo de eletricidade, os medidores inteligentes também podem ser implementados junto a redes de sensores (*SensorBus*) para monitorar e visualizar o consumo de outros recursos (tais como água, gás, vapor, calor, temperatura ambiente, iluminação natural, umidade, presença de pessoas nas instalações, entre outras), contribuindo, dessa maneira, para um gerenciamento integral de recursos energéticos e colaborando com o problema de mudança de hábitos dos trabalhadores (Lamin, 2009)..

## Características dos Medidores Inteligentes

Os medidores inteligentes são aqueles que, além das funções de medição, possuem enlace de comunicação que possibilita a comunicação com a concessionária fornecedora de energia e com outros dispositivos inteligentes presentes nas instalações. Além de proporcionar informações a respeito do consumo de energia ativa (kWh), podem também fornecer informações de energia reativa, demanda instantânea e outros (Felipe, 2009).

Alguns medidores ainda contam com capacidade de armazenamento de dados, com significativa vantagem quanto aos problemas de perda de comunicação. Também possuem saídas RS-485 ou RS-232 e pulsos seriais conforme padrão ABNT, todas em fio metálico, necessitando de conversores optoeletrônicos para a transmissão em fibra óptica. Outros fabricantes, embora poucos, fornecem medidores eletrônicos com saídas ethernet, além de RS-232 e RS-485, o que torna o medidor mais caro, porém facilitando a integração com as tecnologias disponibilizadas por outros fabricantes (Gomes, 2003).

A Figura 3.14 ilustra medidores de energia elétrica fornecidos por diferentes fabricantes e a Figura 3.15 ilustra um medidor de vazão, geralmente utilizado para medir e controlar o fluxo de baixa, média e alta viscosidade, como é o caso de combustíveis líquidos e lubrificantes, com capacidade de oferecer diagnóstico de perdas durante o processo de medição.



Figura 3.14: Medidores Inteligentes Para Monitorar Energia Elétrica.



Figura 3.15: Medidor Inteligente Para Monitorar Combustíveis Líquidos e Lubrificantes.



Figura 3.16: Medidor Inteligente Para Monitorar Água.



Figura 3.17: Medidor Inteligente Para Monitorar Gás.

A Figura 3.16 ilustra um medidor de vazão Dynasonics, especialmente utilizado para água, com capacidade de fornecer informações de fluxo e de qualidade. Este instrumento incorpora display digital para visualização direta de vazão instantânea e total, assim como também saída analógica 4-20mA e saída digital de dados no formato RS-485 para monitoramento remoto.

A Figura 3.17 ilustra um medidor de vazão térmico para gás MASS-VIEW, com saída serial RS-232 e protocolo Modbus, disponível para medir gases como: ar, N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, Ar, C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>, CH<sub>4</sub>, C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>, N<sub>2</sub>O, CO o H<sub>2</sub> o He. Permite visualizar as unidades de vazão, o tipo de gás e o fluxo totalizado.

Para fazer uma adequada gestão dos recursos energéticos, além das medições globais é necessário obter informações detalhadas de cada local e, se possível, de cada circuito ou até mesmo de cada equipamento (Avella et al., 2008; Berglund et al., 2011). O inconveniente é que estas medições poderiam ser muito custosas se forem realizadas com os medidores inteligentes descritos acima.

No entanto, existem tecnologias que permitem fazer estas medições de uma maneira muito mais econômica, através de circuitos eletrônicos e ferramentas denominadas instrumentação virtual (Nazaré et al., 2009).

Um instrumento virtual (VI) consiste em um computador do tipo industrial, ou estação de trabalho, equipado com programas e placas de aquisição de dados que cumprem, em conjunto, as funções dos instrumentos tradicionais, com alto potencial de cálculo, produtividade, exibição e capacidade de conexão dos computadores pessoais e estações de trabalho.

Com os VIs é possível desenvolver sistemas de medição e automação que se ajustem exatamente às necessidades definidas pelo usuário, evitando as limitações impostas pelas funções fixas (definidas pelo fabricante) dos instrumentos tradicionais.

Similarmente a qualquer tipo de programa, o VI é composto por um conjunto de instruções, que fazem a manipulação e fluxo dos dados, e por uma interface com o usuário, na qual se encontram as entradas e saídas necessárias (Nazaré et al., 2009).

## **Dispositivos de Aquisição de Dados Analógicos**

Para adquirir e transmitir um dado desde um sensor a qualquer outro dispositivo são utilizados transmissores e, conforme o caso, coletores de dados. Um transmissor é um dispositivo eletrônico que toma as medições dos sensores e a transmite em tempo real a um dispositivo de controle ou registrador. Por outro lado, os dispositivos de aquisição analógicos ou UTRs (Unidade Terminal Remota) são dispositivos baseados em microcontroladores e sua função é adquirir dados provenientes de sensores e transdutores de campo, como, por exemplo, sensores de temperatura, pressão, umidade e outros, que não estão munidos de inteligência nem possuem saída serial de dados, sendo suas saídas um sinal analógico de tensão. A informação adquirida permanece disponível para a sua comunicação com outros dispositivos inteligentes como CLPs (Controlador Lógico Programável), computadores e sistemas SCADA, mediante saída serial de dados.

Atualmente os dispositivos de transmissão são capazes de armazenar temporalmente um dado adquirido, por isso as definições de transmissor e coletor de dados tendem a se confundir. Hoje em dia algumas UTRs também estão munidas de capacidade de atuação e controle, por este motivo é cada vez mais difícil diferenciar UTRs, CLPs e PACs (Yorio, 2008).

A Figura 3.18 ilustra um dispositivo de aquisição de dados com comunicação *Modbus* serial. Este dispositivo permite obter as medições de sensores e transdutores remotos e distribuídos e pode ser conectado como escravo a sistemas inteligentes de diversos fabricantes, devido à universalidade do protocolo *Modbus* serial utilizado por esse dispositivo.

Existe também a possibilidade de adquirir dados analógicos e transmiti-los na interface RS-232 mediante a utilização de microcontroladores munidos de módulos de comunicação serial, trabalhando junto a circuitos integrados conversores de linguagem TTL- CMOS, como o MAX232.

## **Benefícios da medição inteligente**

Os medidores inteligentes trazem benefícios para o consumidor, para a empresa fornecedora de energia e também para o agente regulador (Felipe, 2009).

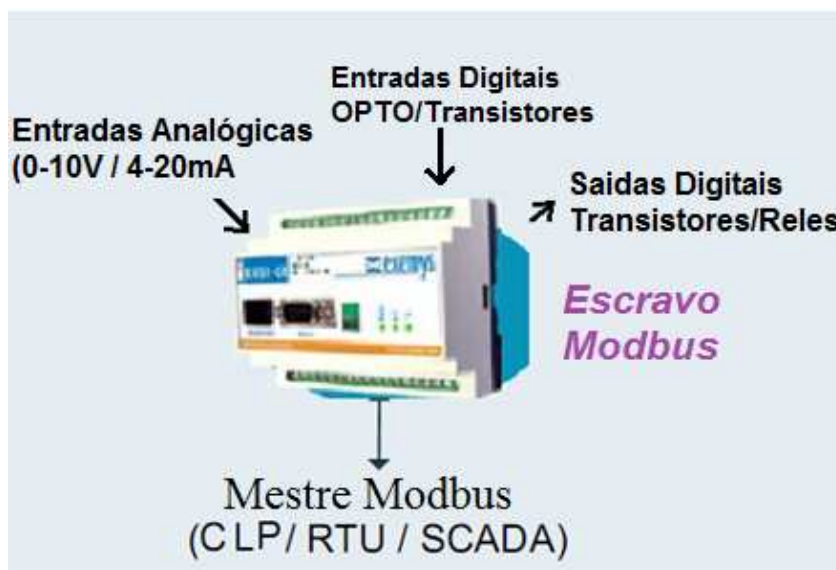


Figura 3.18: Dispositivo de Aquisição.

Os consumidores terão como benefício:

- Melhor compreensão sobre o uso racional da energia no seu dia-a-dia;
- Obter um melhor serviço prestado pela concessionária, recebendo energia de melhor qualidade;
- Poder controlar sua demanda de energia elétrica mediante gerenciamento de cargas não ultrapassando a demanda contratada.

Por outro lado as empresas fornecedoras de energia terão como benefícios:

- Uma ferramenta efetiva para monitorar e gerenciar as suas redes de distribuição e ainda ter um entendimento mais amplo de como melhorar a prestação de serviços ao consumidor;
- Melhorar a visibilidade do consumidor quanto ao seu comportamento de consumo, oferecer tarifas diferenciadas;
- Trabalhar com mais eficiência quanto à utilização de sua rede, identificando faltas no sistema, como interrupções, perdas técnicas e não técnicas, como o roubo de energia e de condutores;
- Introduzir funções remotas de leitura, corte e ligação, melhorando substancialmente a sua receita e eficiência operacional;
- Atuar como fornecedoras de serviços, além da energia propriamente dita, por estarem mais próximas dos consumidores;
- Oferecer tarifas variáveis no tempo, forçando assim aos consumidores a ligar certas cargas somente em períodos de tarifas baixas.

Para o regulador, a implementação de medidores eletrônicos representa a possibilidade de aprimoramento no processo de fiscalização, pois tais sistemas propiciam redução da incongruência das informações na medida em que facilitam a auditoria dos dados, principalmente na apuração dos indicadores de qualidade e faturamento.

Ao oferecerem a possibilidade de tarifas diferenciadas também para consumidores em baixa tensão, a medição eletrônica desenvolve artifícios para deslocar as cargas da ponta para o período fora da ponta. Com isso ocorre a postergação de investimento nos sistemas elétricos e a geração de ponta pode ser reduzida (Lamin, 2009).

### **Parâmetros Monitorados pelos Medidores Inteligentes**

Os medidores inteligentes permitem o monitoramento de mais ou menos parâmetros do uso da energia de acordo com o tipo de medidor. Constitui um dos fatores a serem avaliados pelo projetista na escolha dos medidores a serem utilizados na gestão energética da unidade consumidora.

A seguir serão descritas algumas grandezas físicas e parâmetros que podem ser medidos e monitorados pelos medidores inteligentes, lembrando que estes variam de medidor para medidor.

**Demanda.** Os medidores inteligentes oferecem suporte para todos os métodos normais de cálculo de demanda, podendo efetuar medições em qualquer valor instantâneo e registrar a demanda de pico máxima e mínima. Os registros de demanda de pico podem ser reajustados manualmente (protegidos com uma senha) ou bem introduzir e reajustar automaticamente baseando-se em um programa planejado. As medições incluem:

- Demanda kW, kVAR e kVA, mín./máx;
- Demanda de Ampères e Volts, mín./Max;
- Demanda de qualquer medição instantânea.

**Energia.** Os medidores inteligentes podem fazer medições bidirecionais e monitoramento da energia ativa, reativa e aparente. Podem realizar integração de medidas de potência em intervalos definidos pelo usuário e oferecer medidas como:

- kWh (produzidos e recebidos);
- kWh, kVARh, kVAh líquidos (diferença entre produzidos e recebidos);
- kWh, kVARh, kVAh total (soma entre produzidos e recebidos);
- kVARh, kVAh (produzidos e recebidos);
- Volts-hora e Ampères-hora;
- Integração de qualquer medição instantânea.

**Valores Instantâneos.** Oferecem uma seleção de medições de alta exatidão e alta velocidade, assim como valores eficazes por fase e totais para:

- Tensão e Corrente;
- Potência ativa e reativa;
- Potência aparente;
- Fator de potência;
- Frequência;
- Desequilíbrio de tensão e/ou corrente;
- Inversão de fase.

**Tempo de Uso – TOU.** Os medidores oferecem uma completa medição do tempo de uso (TOU), adaptável praticamente a qualquer estrutura de tarifas de fornecimento. Podem registrar automaticamente os valores TOU em intervalos especificados pelo usuário, em datas e horas predeterminadas ou no momento em que se produz o evento interno ou externo.

**Tendências.** Alguns medidores oferecem acesso a informações históricas no painel frontal, além daqueles registros feitos mediante software de aquisição de dados.

**Registros da Forma de Onda e Qualidades da Energia.** Os medidores inteligentes permitem o monitoramento e captura simultânea de diversos parâmetros e registros de forma de onda para o monitoramento da qualidade da energia.

**Deteção Fora do Limite.** Alguns medidores detectam, registram e geram relatórios referentes às características específicas dos desequilíbrios de tensões e correntes e de variações nas perdas e o fator de potência, a sobretensão ou subtensão.

**Indicadores de Rendimento.** Os medidores podem ser configurados para monitorar uma ampla faixa de indicadores de rendimento do uso da energia incluindo:

- Tempo total de corte de eletricidade (em segundos);
- Duração de distorções harmônicas totais intoleráveis;
- Duração de frequências e fator de potência intoleráveis;
- Tempo de duração de outros índices definidos pelo usuário;
- Harmônicas pares e ímpares totais;
- Harmônicas totais (pares e ímpares);
- Deteção e captura de quedas e oscilações de tensão.

**Registros Coincidentes Mínimos e Máximos.** Alguns medidores fornecem a capacidade de registrar parâmetros chave, como às condições do equipamento que coincidem com uma condição externa com hora e data marcadas com o relógio do medidor. Por exemplo, é possível registrar todas as tensões e correntes do dispositivo de alimentação quando se produza uma condição de demanda pico.

**Sincronização de Tempo e GPS.** Relógios de tempo real permitem datar e registrar o instante de ocorrência dos eventos internos e dos registros de dados com uma resolução de

milissegundos. Podendo ser sincronizado com o cristal interno do medidor, com a frequência da rede elétrica o com um receptor GPS externo, através de uma porta serial.

**Lógica matemática e controle.** Capacidade de realizar cálculos internos sobre qualquer valor medido como, por exemplo, valores de compensação de perdas de transformadores, esquemas de tarifação em tempo real, entre outros.

**Funções matemáticas.** Os medidores inteligentes permitem inserir equações utilizando operadores como os seguintes:

- Aritméticos (+, x, -, ÷)
- Comparativos (>, <, =, ≥, ≤, ≠)
- Lógicos (AND, OR, NOT, TRUE, FALSE, IF)
- Trigonométricos (SIN, COS, TAN, ASIN, ACOS, ATAN)
- Matemáticos (PI, SQRT, POWER, SUM, SUMSQ, AVG, RMS, LOG10, LN, MAX, MIN).

**Lógica Programável e Setpoints.** Os medidores inteligentes permitem estabelecer valores de setpoints que podem ativar:

- Alarmes visuais e acústicos, através de software;
- Registros de dados;
- Registros de formas de onda;
- Controle de Relés.

### 3.5.5 Infraestrutura de Atuação e Controle

Os dispositivos de atuação abarcam desde pequenos relés de controle, autônomos, compactos, munidos de temporizadores e relógios programadores, e outros relés com capacidade de comunicação serial de dados, como o ilustrado na Figura 3.19, até grandes aplicações interconectadas em redes com dezenas de entradas e saídas facilmente ampliáveis, portas de comunicação serial, USB e ethernet e visualização gráfica, como os ilustrados na Figura 3.20.

Dispositivos como UTRs, CLPs e PACs (Controladores de Automação Programáveis), devido à simplicidade e rendimento, são as primeiras opções para o controle de tarefas críticas, nas quais um computador poderia estar sobrecarregado devido ao trabalho gerado por numerosas tarefas adicionais, como a gestão e visualização de dados e acessos a periféricos e bases de dados. Porém, para viabilizar uma rede FAN munida de sistema SCADA, que além do controle de tarefas, fornece tratamento de dados, trabalhos em redes e HMI, deve-se contar com um ou uma rede de computadores atuando em conjunto com esses dispositivos controladores distribuídos.

## Controlador de Automação Programável

Um PAC (Figura 3.20) é uma evolução da tecnologia industrial CLP, orientado ao controle automatizado e a aquisição de dados. O PAC refere-se ao conjunto formado por um controlador (CPU), módulos de entradas e saídas e um ou múltiplos barramentos de dados que fazem a interconexão.

Os PACs surgiram pela necessidade de lograr controles avançados difíceis de conseguir por meio de CLPs tradicionais. Esta tecnologia combina eficientemente a confiabilidade de um CLP com a flexibilidade de monitoração e cálculo de um computador.

Sua semelhança com um computador industrial radica na sua configuração interna de processamento e armazenamento de dados, ainda que o sistema de tratamento das portas e a aquisição de dados funcionam de forma similar a um CLP (Yorio, 2008).

Os conceitos de PAC e CLPs são muitas vezes confundidos e por algum tempo determinados fornecedores de dispositivos de automação fabricaram equipamentos com as características dos PACs, porém com o nome de CLP (Petrovic, 2008).



Figura 3.19: Relés inteligentes com capacidade de comunicação de dados.

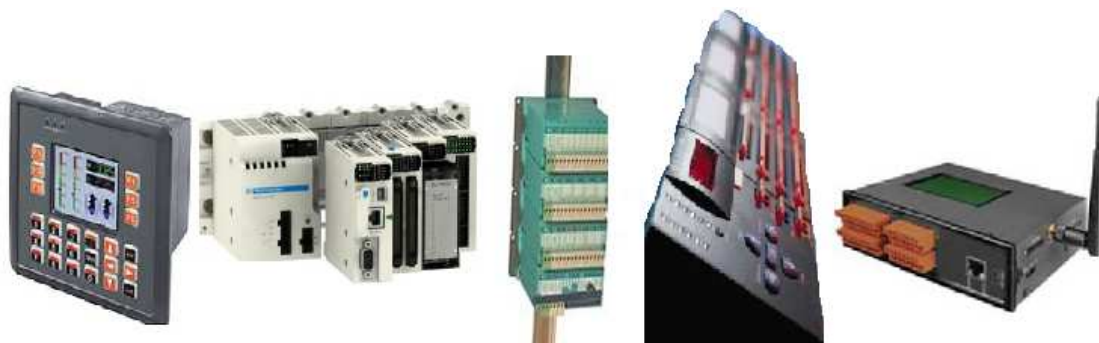


Figura 3.20: Controladores de Automação Programável PACs.

### 3.6 Conclusão

A *Smart  $\mu$ Grid* é um projeto de muitos projetos, e permite realizar uma enorme gama de funções que contribuem não só para a gestão integral da energia como também para outras atividades dentro de uma organização, como por exemplo, ativar alarmes de incêndio, identificar intrusos em áreas reservadas, prover suporte de comunicação entre o pessoal, e diversas outras funções. Sua instalação é, portanto, uma tarefa contínua de aperfeiçoamento a novos horizontes, dado que sobre ela é possível periodicamente projetar novos cenários. Devido a este fato e à grande diversidade de tecnologias em contínua evolução que viabilizam a sua construção, a *Smart  $\mu$ Grid* requer de um grande esforço de planejamento inicial para mantê-la atualizada e permitir a fácil expansão.

Entre os meios de comunicação, as tecnologias sem fio, ainda que implementadas para complementar as redes ligadas por meio de fios, atualmente possuem capacidade para atender a grande maioria das aplicações dentro de uma *Smart  $\mu$ Grid*, ficando limitadas unicamente para atender questões de proteção. Se é avaliada a sua rápida evolução, em termos de velocidade de transmissão e segurança e as técnicas de modulação que auxiliam a sua implementação, é de se esperar que, muito em breve, já não será apenas um complemento das redes ligadas por fio, mas sim uma tecnologia substituta.

Na medida em que as *Smart  $\mu$ Grid* crescem em número e tamanho, poderão ser interligadas e comercializar recursos energéticos entre si. Esta conjuntura mudará as questões relacionadas ao mercado, dando participação ativa ao cliente, que poderá atuar tanto como cliente como também vendedor em determinadas situações. Os fornecedores por sua parte terão a possibilidade de oferecer modalidades tarifárias bem dinâmicas.

Uma *Smart  $\mu$ Grid* pode estar dividida em diversas sub-redes com finalidades particulares, todas interligadas a uma rede principal, porém é importante que as questões mais críticas, como os tempos de retardo, sejam adequadamente tratadas.

## Capítulo 4

# Um Modelo *Smart $\mu$ Grid* Para o Parque Tecnológico Itaipu

### 4.1 Introdução

No presente capítulo é proposta uma arquitetura tipo *Smart  $\mu$ Grid* através da qual é possível atender diversas atividades do SGIE proposto no Capítulo 2 pro Parque Tecnológico Itaipu. Porém, espera-se que essa microrrede inteligente funcione como um laboratório vivo, para que alunos de graduação e pós-graduação possam apreender sobre *Smart Grid* atuando sobre uma. Desse modo será possível a formação de profissionais com conhecimentos relacionados com: inserção na rede de pequenos geradores de diversas tecnologias de transformação, sistemas físicos e lógicos de comunicação digital que facilitam a gestão da rede, de vital importância para desenvolver e manter a arquitetura proposta, soluções para a interoperabilidade de diversas tecnologias integradas na rede e sistemas de medição inteligente.

Na visão de um laboratório vivo pretende-se que a proposta auxilie na necessidade de formar profissionais com capacidade de entender e desenvolver essa nova visão do sistema elétrico do futuro, a *Smart Grid*. Por outro lado, a estrutura tecnológica deverá atender, de forma didática, as necessidades do SGIE a ser implementado no parque, sistema este que também cumpre a função de capacitar mão de obra em gestão energética. Não obstante, para que esse aprendizado seja adequado, é necessário que a arquitetura da rede proposta integre diversos tipos de tecnologias, mesmo que isso se traduza em maiores investimentos e se sacrifique a arquitetura tecnológica ótima do ponto de vista da gestão energética, porém, dessa forma, será possível aproximar o modelo proposto com a realidade encontrada em campo. Também será possível estudar as soluções propostas para permitir a interoperabilidade entre tecnologias, sendo este um dos grandes desafios em uma *Smart Grid*, e as diversas tecnologias de comunicação e os protocolos utilizados para que a mesma ocorra, o qual está intimamente relacionado com o problema de interoperabilidade citado.

Outro aspecto que faz parte do modelo, e que contribuirá para a formação de competências específicas, é a adoção de um sistema SCADA que deverá emular as funções de

um sistema de gerenciamento da rede de distribuição (DMS<sup>5</sup>), através do qual ocorrerá a coordenação em tempo-real dos diversos RECs integrados na microrrede.

## 4.2 Características do Parque Tecnológico Itaipu

O Parque Tecnológico Itaipu foi implantado pela Itaipu Binacional em 2003, nas antigas instalações que faziam parte dos alojamentos dos operários que construíram a usina hidrelétrica. Conta com mais de 50.000 metros quadrados de área construída, distribuídos em vários blocos (Figura 4.1), que abrigam salas de aula, laboratórios de pesquisa, espaço empresarial, biblioteca, auditórios, salas de videoconferência, além de espaço para congressos e convenções.

O parque possui diversos centros de carga interligados através da microrrede elétrica e pode, portanto, ser considerado como uma unidade consumidora de grande porte. O esquema da rede elétrica é ilustrado na Figura 4.2.

Uma rede subterrânea de 13,8kV, ingressa na cabine de entrada onde se encontram módulos de medição, módulos de proteção e módulos de distribuição. Da citada cabine partem três redes que chegam até o primário dos diversos transformadores de potência que alimentam os diferentes blocos, conforme o mostrado na Tabela 4.1.



Figura 4.1: Parque Tecnológico Itaipu.

---

<sup>5</sup> DMS: do inglês *Distribution Management System*

O parque ainda conta com a possibilidade de gerar parte da energia consumida através de geradores distribuídos, como um gerador acionado por motor diesel, sistema fotovoltaico, e uma microturbina a gás.

O gerador diesel é da marca Heimer Silent de 150KVA e fator de potência 0,8.

Um sistema fotovoltaico pertencente à UNIOESTE, está formado por painéis fornecidos pela empresa Solarterra Energias Alternativas que consistem em dois sistemas de geração solar de 500Wp cada, compostos por:

- Módulos solares fotovoltaicos silício monocristalino Solarterra modelo HG50 potência mínima de 50Wp e potência máxima de 60Wp. Tensão nominal no ponto de máxima potência 17.0V.
- Banco de baterias estacionárias composto por 2 monoblocos marca Johnson Controls modelo DF2500 totalizando 300Ah C20 de capacidade.
- Controlador de carga e descarga eletrônico, com capacidade 40A 24Vcc marca Phocos modelo CX40.
- Inversor de conexão à rede elétrica, com potência de 1000VA, entrada de tensão de 12Vcc a 24Vcc, e saída de 127V 60Hz, eficiência típica > 94%. Ventilação natural marca Beeland modelo BLP-1000.

A microturbina também pertencente à UNIOESTE é da marca CAPSTONE Modelo C30 acionada por gás com capacidade de gerar 30kW - 60 Hz, fator de potência 0,8.

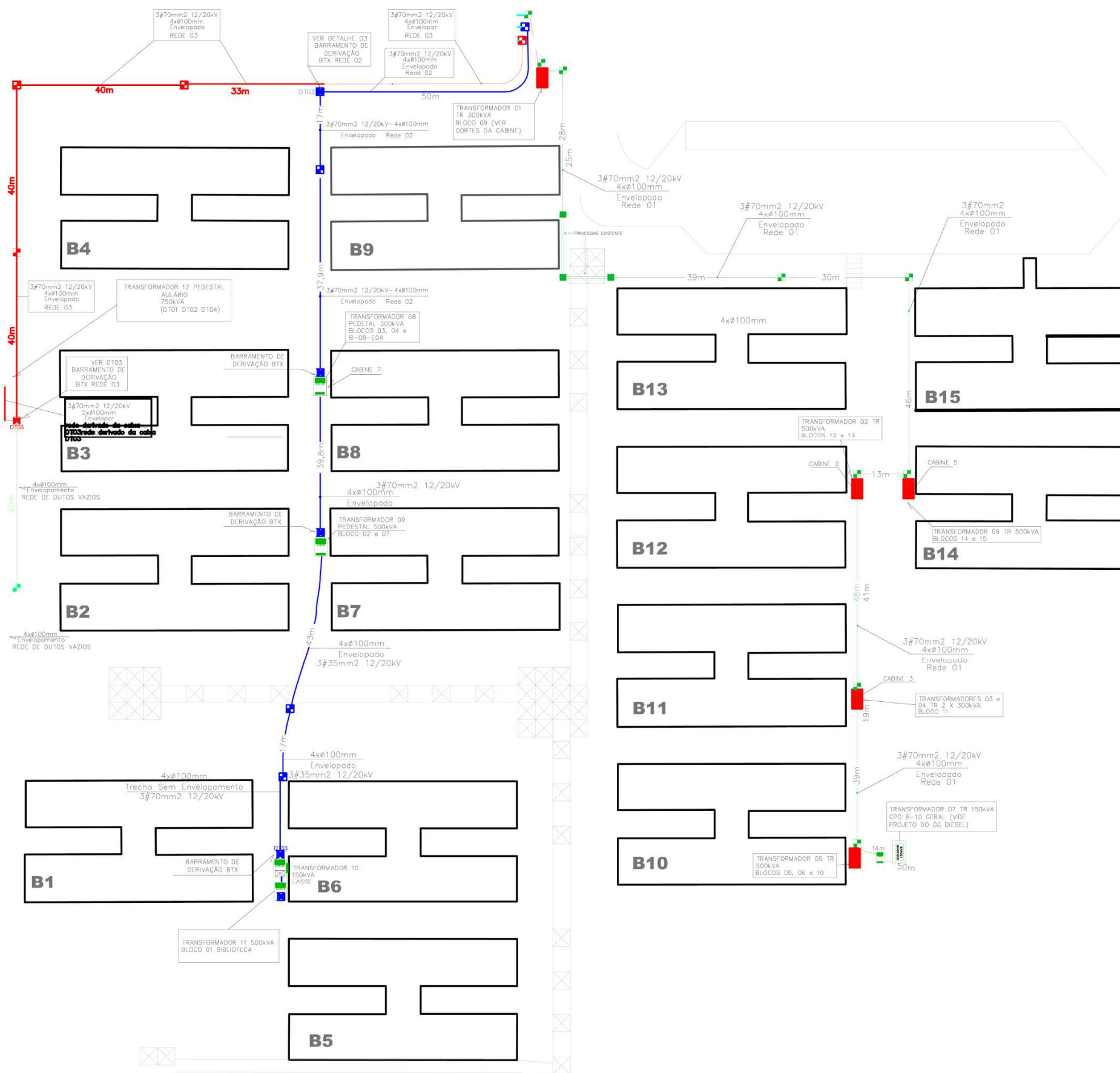


Figura 4.2: Circuito Elétrico do Parque Tecnológico Itaipu.

Tabela 4.1: Distribuição de Energia Elétrica no PTI

| Rede | Transformadores | Potência Nominal | Blocos            |
|------|-----------------|------------------|-------------------|
| 01   | T01             | 300KVA           | 09                |
|      | T02             | 500KVA           | 12 e 13           |
|      | T03 e T04       | 300KVA           | 11                |
|      | T05             | 500KVA           | 5, 6 e 10         |
|      | T06             | 500kVA           | 14 e 15           |
|      | T07             | 500 KVA          | Projeto GD Diesel |
| 02   | T08             | 500KVA           | 03, 04 e 08       |
|      | T09             | 500KVA           | 02 e 07           |
|      | T10             | 150KVA           | 06                |
|      | T11             | 500 KVA          | 01                |
| 03   | T12             | 750 KVA          | Aulário           |

### 4.3 Arquitetura de Rede

A arquitetura *Smart  $\mu$ Grid* proposta para a rede que alimenta o Parque Tecnológico Itaipu é ilustrada na Figura 4.6. Como pode ser observado, será implementada mediante uma rede LAN composta de diversos controladores individuais distribuídos, responsáveis de diversas estratégias de gestão através do controle das cargas e dos diversos REDs.

Os controladores executarão algumas tarefas de forma individual, baseados em medições locais, e outras a partir de informações advindas de um Controlador Central, o qual considera integralmente todos os eventos que ocorrem nas diversas instalações e envia comandos para os diversos controladores distribuídos. Estes diversos controladores compõem uma arquitetura FAN mista baseada na pirâmide de área de aplicação e automação (Figura 3.3).

As lógicas de controle poderão ser modificadas desde diversas HMIs, dispostas nos vários dispositivos de campo e em computadores munidos do SCADA. Assim, pessoas autorizadas podem interagir com a rede, consultando e modificando parâmetros do processo quando necessário.

A arquitetura propõe dois tipos de sistemas SCADA-HMI. O primeiro é constituído por computadores colocados nos principais escritórios de cada bloco, formando o denominado SCADA-HMI Local, a partir dos quais usuários autorizados podem interagir somente com os

processos internos do respectivo bloco, não podendo modificar nem visualizar processos dos blocos vizinhos. O segundo sistema estará disposto na cabine de entrada do parque, formando o chamado SCADA-HMI Global, onde será possível acessar, visualizar e modificar os processos e estados de todos os dispositivos de campo do parque e alterar as lógicas de controle de todos os blocos e REDs.

Os sistemas SCADA-HMI Global e Local permitem, através de seus aplicativos, a recepção e tratamento de uma imensa quantidade de dados advindos dos múltiplos dispositivos de campo. Assim, torna-se possível atender diversas atividades do SGIE proposto no Capítulo 2. É possível arquivar dados e fazer comparações periódicas com a linha de base de gestão, verificando dessa maneira se as ações de gestão energética modificam os indicadores de gestão. Também é possível calcular diversos parâmetros estatísticos e realizar gráficos de correlação entre diversas variáveis de controle por centros de custos, o qual auxilia na realização da atividade de Planejamento das Ações.

Os aplicativos ainda podem agrupar e realizar de forma automática diversos gráficos e tabelas que facilitam a Avaliação dos Resultados e o Acompanhamento e Divulgação de Indicadores Energéticos. Além disso, os resultados da análise desses dados podem ser utilizados para sistematizar os registros necessários para a Documentação do SGIE, e, mediante a infraestrutura de comunicação, é possível automatizar o processo de Verificação por parte da Alta Direção da Organização.

Na arquitetura proposta, a rede elétrica também contará com um PCC (ponto de conexão comum) com a rede de distribuição da concessionária, Figura 4.6, onde será disponibilizado um controlador com atuação manual e automática para que a rede possa trabalhar de forma ilhada em determinados períodos com elevada capacidade de geração interna ou em momentos de falhas na rede de distribuição. A decisão de atuação automática será tomada pelo Controlador Central, com base nas informações advindas dos controladores distribuídos, nos dispositivos de armazenamento e nos diversos geradores distribuídos e também considerando as informações do preço da energia elétrica no respectivo período.

Quando a rede trabalha de forma isolada, os níveis de frequência e tensão passam a ser controlados pelos controladores dos geradores distribuídos, que realizam atuações considerando as informações provenientes das medições locais e as advindas do Controlador Central e das HMIs.

A energia elétrica é medida na cabine de entrada através de um medidor com capacidade de executar medições bidirecionais de energia, facilitando dessa forma a integração da microrrede com o mercado de energia, seja pela possibilidade de receber tarifas diferenciadas segundo a hora do dia ou pela possibilidade de vender excedentes em períodos de excedentes internos. A comercialização da energia também poderia ocorrer por meio de uma interface com veículos elétricos dispostos nos locais de estacionamento, onde seriam disponibilizados os preços de energia para compra e para venda. Espera-se que os proprietários de veículos optem por comprar energia em períodos fora de ponta, quando o preço for mais baixo, e por vender energia para a rede nos momentos de ponta, quando o

preço for elevado, permitindo assim uma suavização da curva de demanda interna ao longo do dia.

A arquitetura proposta pode ser classificada em três níveis, os quais serão descritos a seguir.

### 4.3.1 Nível de Campo

Este é o nível inferior, onde se encontrarão os dispositivos de medição local, sensores e atuadores, próprios de cada sala ou conjunto de salas, incluindo medidores de consumo elétrico, água, gás, sensores de temperatura, de intensidade luminosa, sensores de presença, bancos de capacitores e disjuntores, entre outros.

Algumas das medições locais poderão ser realizadas por meio de simples circuitos eletrônicos de baixo custo, implementados no próprio parque. Estes dispositivos normalmente serão conectados a um CLP, que atuará como escravo do controlador do nível de controle, conforme ilustra a Figura 4.3.

No CLP escravo serão implementados os algoritmos de controle de carga e algoritmos de controle de fator de potência local. Questões como desligar e ligar dispositivos de iluminação e ar condicionado em ausência ou presença de pessoas nas salas, fechar e abrir cortinas automaticamente, ligar e desligar cargas serão principalmente implementadas mediante a tecnologia ZigBee e Bluetooth, que, conforme o estudado no capítulo anterior, respondem adequadamente para atender os requisitos dentro de uma PAN (*Personal Area Network*) formada por esse nível.

No nível de Campo também se encontram os sistemas que fazem o controle dos transformadores de potência, os quais atuam como escravo do controlador do Nível de Controle. Esses controladores, com base em medições locais, atuarão sobre os dispositivos de proteção e comunicarão ao controlador mestre do bloco os parâmetros do transformador, tais como: carregamento, temperatura, pressão do óleo e estado dos dispositivos de proteção, permitindo que todas essas informações possam ser visualizadas nos sistemas SCADA-HMI Local e Global. Porém, os comandos de proteção serão executados localmente, sem autorização dos controladores mestres, conforme propõe a norma IEC 61850.

### 4.3.2 Nível de Controle

O Nível de Controle consiste em uma rede interna dentro de cada bloco, a qual interligará as redes do Nível de Campo a um controlador que, normalmente, atuará como mestre dos controladores de campo e como um *gateway* entre o Nível de Controle e o Nível de Gerenciamento, conforme ilustra a Figura 4.4.

A arquitetura deste Nível de Controle e os meios de comunicação e as tecnologias de rede não necessariamente deverão ser os mesmos para cada bloco, bastando com que seja possível a ligação com a rede do Nível de Gerenciamento. Desse modo permite-se a utilização de distintas tecnologias e meios de comunicação, admitindo enlaces com e sem fios, o que fornece uma resposta adequada para fins didáticos, requisito estabelecido pelo laboratório vivo a ser implementado sobre a arquitetura.

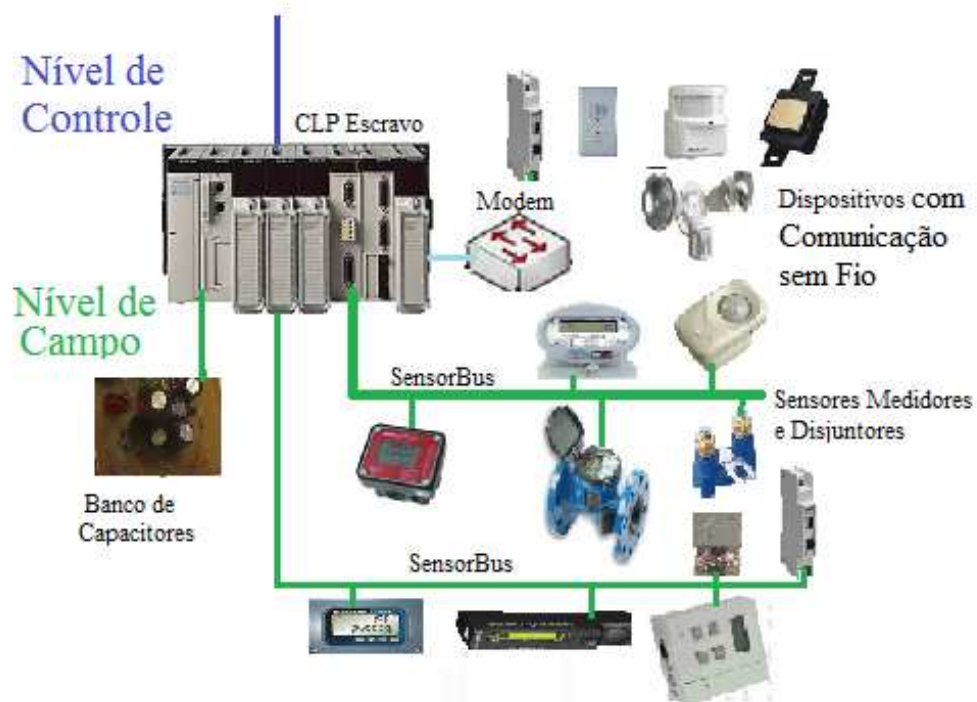


Figura 4.3: Exemplo de Interconexões do Nível de Campo Para a *Smart μGrid* do Parque Tecnológico Itaipu.

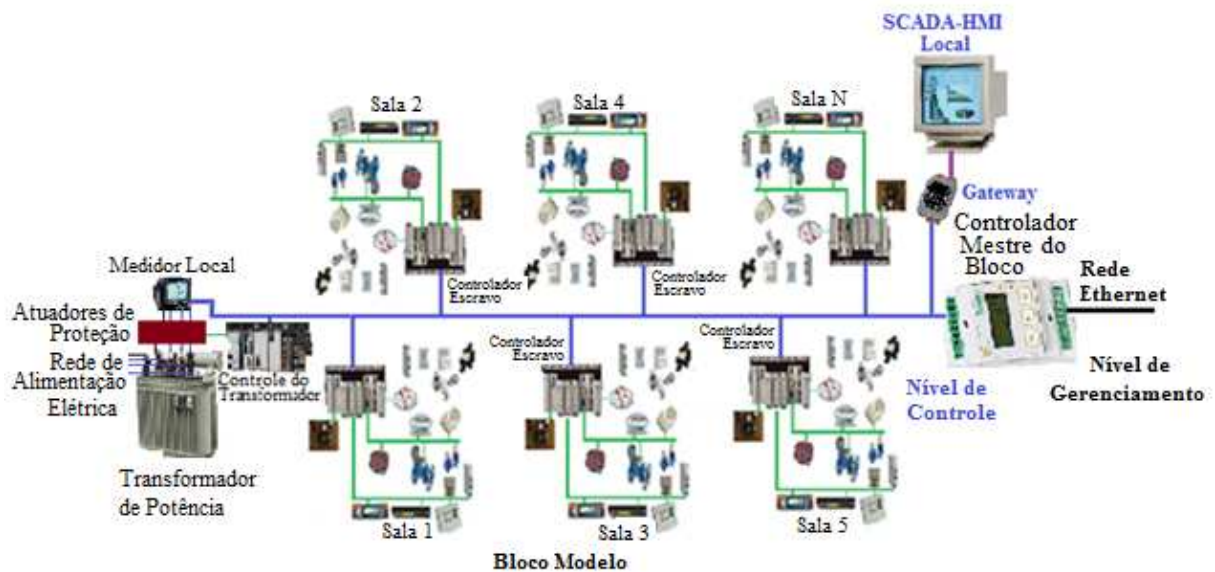


Figura 4.4: Interconexões do Nível de Controle Para a *Smart μGrid* do Parque Tecnológico Itaipu.

As redes de controle presentes em cada bloco possuem um medidor local de energia elétrica, que faz a medição do total de energia consumida no respectivo bloco e envia as medições ao controlador mestre do bloco. Todos os processos que ocorrem internamente no bloco podem ser visualizados e alterados através do SCADA-HMI Local.

Além das redes de controle presentes nos blocos, também se encontram neste nível as redes de controle da plataforma de integração com veículos híbridos e uma plataforma de administração de geradores distribuídos, conforme ilustra a Figura 4.5.

### Plataforma de Administração de Recursos Energéticos Distribuídos

A plataforma de administração de recursos energéticos distribuídos (Figura 4.5) é administrada pelo PAC (Controlador Central), com alta velocidade de cálculo, que atua como elemento centralizador da arquitetura. Ele é configurado como o nó mestre da rede do Nível de Gerenciamento.

Ao Controlador Central se conectam os controladores distribuídos, que constam de CLPs escravos responsáveis pelo controle dos geradores distribuídos e o controle dos dispositivos de armazenamento. Também a ele se conecta a saída de dados do medidor global de energia elétrica da concessionária.

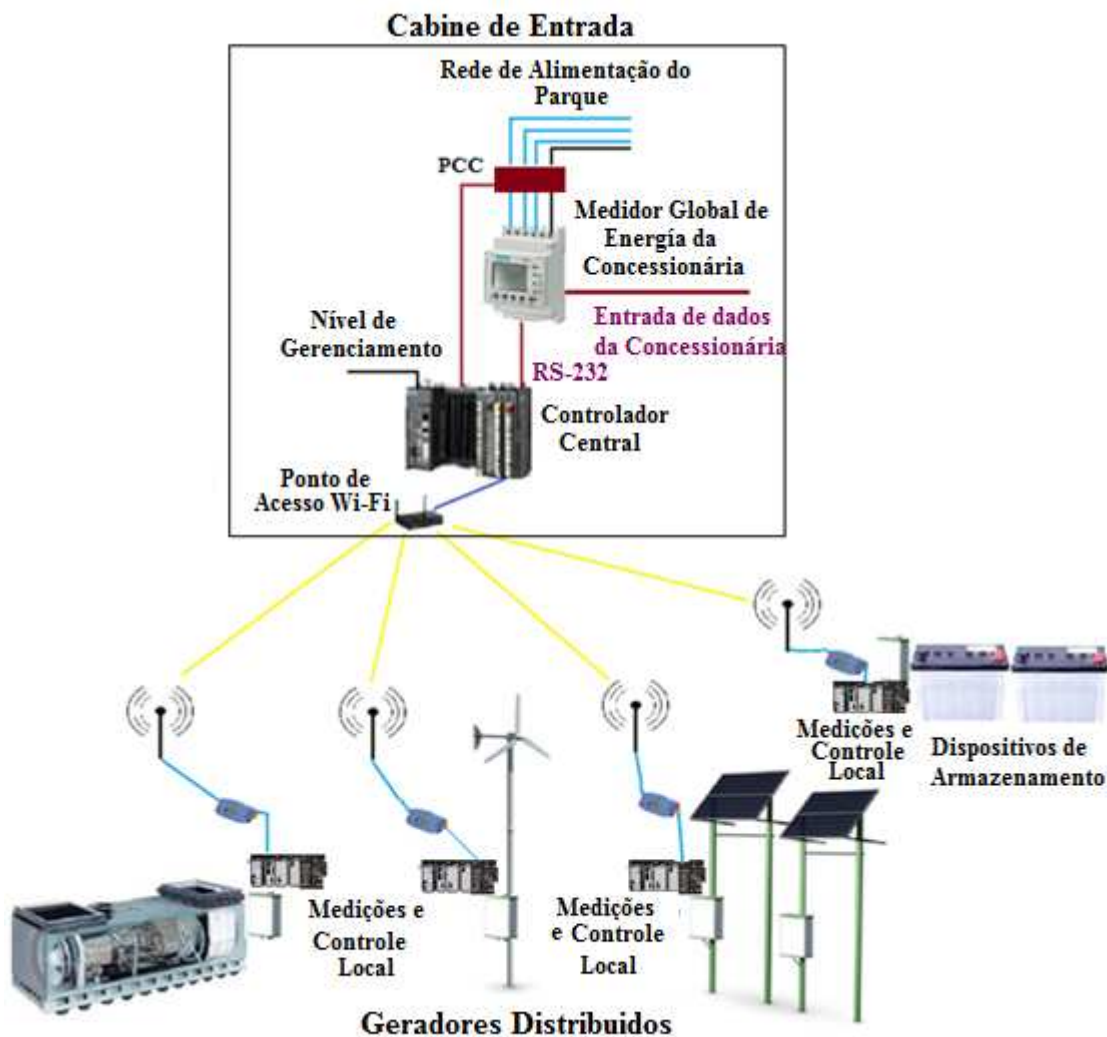


Figura 4.5: Plataforma de Administração de Recursos Energéticos.

Os controladores dos diversos geradores distribuídos e dos dispositivos de armazenamento proporcionam ao Controlador Central informações do estado dos geradores, informações de falhas, estados dos sistemas de proteção, energia sendo consumida, energia disponível, qualidade da energia e parâmetros que permitem estimar o custo de produção. Essas informações serão transmitidas mediante uma rede Wi-Fi ponto–multiponto.

Por outro lado, o medidor global de energia elétrica da concessionária consta de um medidor trifásico conectado na entrada da rede, que efetuará medições bidirecionais e fornecerá ao Controlador Central os valores de consumo por fase e global, preço da energia e também informações de sincronismo (início e fim de cada intervalo de integração). Essas informações serão transmitidas através de um canal de comunicação RS-232 com cabo coaxial tipo STP. Com base nestes dados o Controlador Central toma decisões a respeito do uso que se dará à energia, conforme se explica detalhadamente na seção 4.4, e envia instruções de controle aos diversos escravos.

### 4.3.3 Nível de Gerenciamento

Com o objetivo de tomar decisões de forma global, o Nível de Gerenciamento interliga os controladores mestres de cada bloco e de cada plataforma através de uma rede Ethernet Powerlink, na qual o controlador central é configurado para atuar como mestre, conforme ilustra a Figura 4.6.

Ligados a essa rede encontram-se o sistema SCADA-HMI Global, o sistema de controle da plataforma de integração com veículos elétricos e os controladores mestres de cada bloco, que aqui atuam como escravos do Controlador Central.

O Nível de Gerenciamento também possui um ponto de acesso GPRS, que permite a comunicação da rede com dispositivos remotos, como celulares e notebooks. Assim, usuários poderão receber informações automáticas predefinidas em seus dispositivos portáteis. Este ponto de acesso futuramente também pode ser utilizado para estabelecer a comunicação com a agência reguladora do mercado da energia, aproveitando o grande alcance das comunicações GPRS e a simplicidade de sua estrutura que evita custosas construções de redes de área amplas ligadas através de fios.

### Rede Ethernet

Na década de 80 a IEEE desenvolveu o projeto 802 que propôs padrões para o desenho e compatibilidade de dispositivos que operam nos níveis físicos e de enlace de dados, sendo a especificação 802.3 pertencente à Ethernet. Essa especificação realiza as mesmas funções que os níveis físicos e de enlace de dados do modelo OSI. A Ethernet é um padrão aberto que não pertence a nenhuma indústria em particular, consequentemente facilita a integração de dispositivos de diferentes fabricantes, sendo o meio de acesso mais conhecido utilizado em cenários de redes LAN. O mesmo tem conseguido grande aceitação pelos fabricantes de equipamentos que atualmente estão desenvolvendo diversos dispositivos de automação com mais de uma porta Ethernet. Como vantagem adicional, as placas, conectores RJ45 e M12 e cabos para Ethernet possuem baixos custos e são amplamente disponíveis no mercado (Aguirre, 2007).

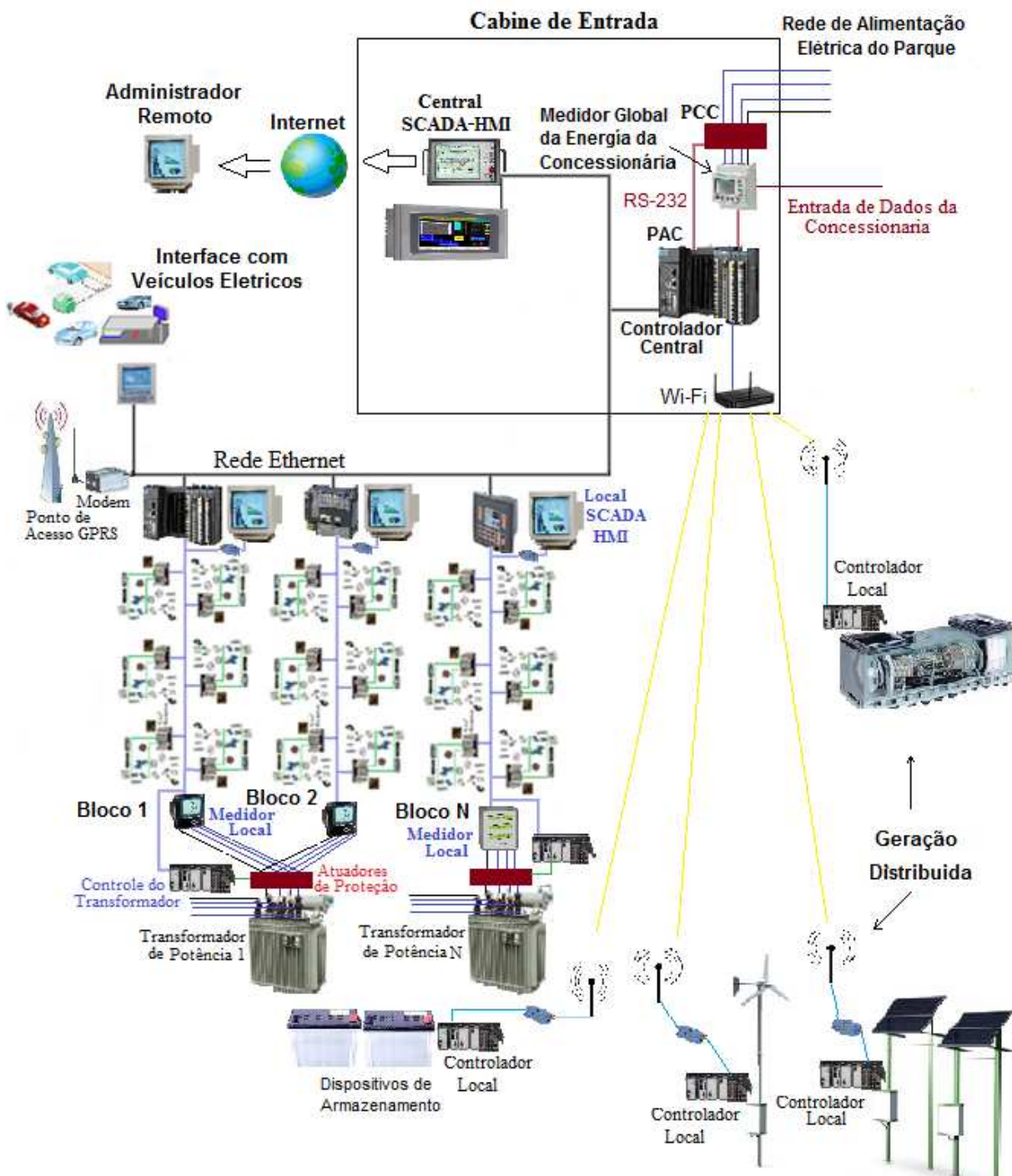


Figura 4.6: Modelo *Smart μGrid* para o Parque Tecnológico Itaipu.

O formato de quadro da camada de enlace do padrão IEEE 802.3 é mostrado na Tabela 4.2. Ele possui um preâmbulo de sete bytes, responsável pela sincronização do receptor com o sinal, seguido de um byte de início de quadro e logo 6 bytes de endereço de destino e 6 bytes de endereço de origem. A seguir tem-se o tamanho do campo de dados que pode estar entre 0 e 1500 bytes (se os dados forem menores de 46 bytes utiliza-se um enchimento para completar os 46 bytes). Finalmente têm-se os dados a serem transmitidos e no final do quadro

há um campo CRC (*Cycle redundancy check*) que consiste em um código de verificação de 32 bits que faz a verificação do cabeçalho de dados.

A Ethernet é a arquitetura de rede mais popular, trabalha com os sistemas operativos de rede mais conhecidos, utiliza topologia de barramento linear ou estrela. Para acessar o meio, um dos procedimentos utilizados pela Ethernet é o método de acesso múltiplo por detecção de portadora e detecção de colisões (CSMA/CD), no qual cada equipamento da rede antes de transmitir ouve o detecta o meio (detecção de portadora), para verificar possíveis colisões. Se o dispositivo detecta uma possível colisão espera um período de tempo aleatório antes de tornar a transmitir (detecção de colisões). A possibilidade de detecção de colisões está limitada a 2.500m de distância entre equipamentos. Para maiores distâncias a atenuação do sinal transmitido impede sua detecção e, portanto, já não se pode garantir que um equipamento no outro extremo esteja ou não transmitindo.

Caso haja uma colisão, todos os equipamentos deixarão de transmitir dados durante um período de tempo aleatório. Cada equipamento determina seu período de espera, reduzindo a possibilidade de que os equipamentos tornem a transmitir simultaneamente. Entretanto, aumenta a latência da rede.

Para atender maiores velocidades de transmissão se estabeleceu o padrão Fast Ethernet, que levou os limites de velocidade de 10 Mbps para 100Mbps, a partir de ligeiras mudanças na estrutura do cabeamento existente. Existem três tipos de Fast Ethernet: 100Base-TX para o uso de par trançado UTP categoria 5, 100Base-FX para o uso com fibra óptica e 100Base-T4 para o uso de cabos UTP de categoria 3. A norma 100Base-TX tem sido a mais popular devido a sua compatibilidade com a anterior 10Base-T.

Até agora os equipamentos eram ligados à rede mediante hubs, que não são dispositivos inteligentes. Eles retransmitem a informação que chega a uma de suas portas a todas as demais, sem analisar o quadro para determinar que estação é a destinatária da mensagem. Em consequência, todas as estações compartilham o meio físico, e a largura de banda se subdivide entre elas e, consequentemente, o tráfego na rede fica mais pesado, principalmente em redes com grande número de dispositivos interconectados. Logo, aumenta a probabilidade de colisões, e diversos dispositivos podem gastar tempo esperando uma oportunidade de acesso. Portanto, a latência de rede aumenta e pode ficar limitada para algumas aplicações industriais, como em alguns casos da *Smart  $\mu$ Grid* que necessitam estritos requisitos de latência.

Porém, para estender os horizontes e adequar-se para essas aplicações que requerem atenção em tempo real, nos últimos anos têm ocorrido avanços nos padrões Ethernet, especialmente no âmbito de determinismo, velocidade e prioridade.

A substituição do Hub pelo Switch deu à rede maior inteligência. Um switch opera de forma semelhante a um Hub, porém se caracteriza por ser um dispositivo inteligente que analisa o quadro que recebe por uma de suas portas e determina a direção MAC do destinatário e do remetente, reenviando o quadro somente para a porta correspondente. Se a

direção de destino é desconhecida o quadro é enviado a todas as portas. O switch não retransmite colisões nem produtos de colisões ou quadros defeituosos. Com isso, contribui para reduzir o carregamento da rede.

A utilização do switch introduziu melhoras no esquema CSMA/CD básico, refletido no seu funcionamento inteligente, e deu origem à chamada Gigabit Ethernet que utiliza a mesma estratégia que a adotada na Fast Ethernet. Apesar de que define um novo meio e uma especificação para a transmissão, continua-se adotando tanto o protocolo CSMA/CD como o formato de quadro de Ethernet a 10Mbps e 100Mbps. A Gigabit Ethernet é compatível com 100Base-T e 10Base-T facilitando a migração (Stallings, 2004).

Os padrões Ethernet mais comuns atualmente são: Ethernet POWERLINK, Ethernet/IP, Profinet, EtherCAT e SERCOS III. Estes padrões podem atingir velocidades da ordem de dezenas de Gbps, tornando assim possível atender latências de poucos microssegundos.

Assim, fazendo uso desse novo panorama das arquiteturas Ethernet industrial para o Nível de Gerenciamento da arquitetura de rede local proposta será utilizado o padrão Ethernet Powerlink. Esta é uma solução aberta e totalmente baseada em software, promovida pela EPSG (*Ethernet Powerlink Normalization Group*). Desenhado especialmente para a automação de processos com estritos requisitos de latência, o Powerlink é um protocolo que utiliza o campo “Dados” do quadro ethernet, Figura 4.7, podendo trabalhar com um tempo de ciclo de 200 $\mu$ s e com um jitter<sup>6</sup> abaixo de 1 $\mu$ s, adequado, portanto, para conseguir que os diversos dispositivos de automação e controle possam comunicar-se de forma rápida e precisa, atendendo os estritos requisitos de latência de rede demandados para as diversas funções da *Smart  $\mu$ Grid* estudados no capítulo anterior (Wlas et al., 2011).

O PowerLink pode utilizar largura de banda variável na faixa de frequência entre 24 e 1000 KHz, proporcionando flexibilidade para transmitir todos os serviços desejados na banda disponível, permitindo assim realizar uma eficiente combinação de serviços de maneira mais conveniente em função da taxa de bits disponível.

Tabela 4.2 Formato de Quadro do Padrão IEEE 802.3. Fonte: Stallings (2004).

| Bytes | 7         | 1                               | 6                   | 6                  | 2                         | 0-1500 | 0-46       | 4                   |
|-------|-----------|---------------------------------|---------------------|--------------------|---------------------------|--------|------------|---------------------|
|       | Preâmbulo | Início do delimitador de quadro | Endereço de destino | Endereço de Origem | Tamanho do campo de dados | Dados  | Enchimento | Soma de verificação |

<sup>6</sup> Medida de variação do atraso entre os sucessivos pacotes de dados.

O que distingue a Ethernet POWERLINK, comparada com outras redes, é a sua acessibilidade. Há uma pilha de protocolo disponível gratuitamente que é chamado openPOWERLINK. Sendo uma das últimas versões disponíveis atualmente o openPOWERLINK\_V1.7. Essa versão contém exemplos de programas que podem ser executados em computadores com Windows ou Linux. Também há um software livre disponível para fazer a configuração de todos os dispositivos da rede, denominado openCONFIGURATOR.

Na arquitetura Ethernet Powerlink proposta o Controlador Central será configurado para atuar como mestre, responsável pelo gerenciamento da rede, e os dispositivos de controle que atuam como *gateways* entre as redes do Nível de Controle e a rede Ethernet são configurados como escravos do Controlador Central e como mestres dos controladores do Nível de Campo, simultaneamente. Assim, o tráfego da rede fica comandado pelo Controlador Central, evitando o uso de switch, melhorando a velocidade de transmissão.

Além disso, na arquitetura Ethernet Powerlink não ocorrem colisões, já que todo o tráfego está regulado pelo Controlador Central, que faz o gerenciamento da comunicação entre os vários nós de controle, os quais são sincronizados mediante um sinal de relógio repetido com uma exatidão inferior a 100ns, que constitui o tempo de ciclo. Durante cada ciclo o mestre envia para cada nó de controle uma solicitação para o envio de seus dados e os escravos respondem imediatamente mediante mensagens broadcast, para que todos os restantes nós de controle possam ouvir sem que o nó de gestão tenha que fazer a transferência. Dessa forma os dados provenientes de diversos setores da rede podem ser acessados nos computadores da arquitetura SCADA-HMI Global, sem a necessidade de intervenção do Controlador Central.

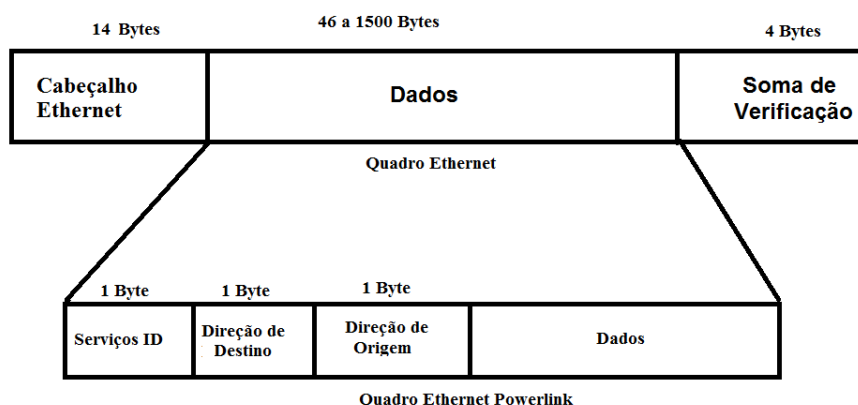


Figura 4.7: Quadro Ethernet Powerlink. Fonte: Gonçalves (2010).

Assim, as comunicações são organizadas em ciclos de duração finita e cada ciclo é constituído por quatro fases distintas. Numa primeira fase o Controlador Central envia uma mensagem broadcast que sincroniza os escravos. Na segunda fase do período, *Cyclic Period*, o Controlador Central verifica se todas as estações estão comunicáveis, através de um sistema de “pergunta/resposta”. Se todas as estações comunicarem, pode-se então avançar para a comunicação entre os escravos. No final desta fase, o mestre envia um frame “*End-of-Cyclic Period*”. Na fase de *Asynchronous Period* o Controlador Central vai inquirindo os escravos que previamente tenham informado o mestre a sua disponibilidade de informação para transmitir. Nesta fase o mestre endereça um módulo em cada ciclo.

A Ethernet Powerlink já dispõe de todas as possibilidades de comunicação mediante a pilha de protocolos TCP/IP (Protocolo de Controle de Transmissão / Protocolo Internet), que serão utilizadas para que usuários possam ter acesso ao sistema desde um servidor remoto mediante uma conexão à internet, e assim possam interagir com a rede e fazer ajustes *on-line* nos parâmetros de controle e obter dados, gráficos e resultados dos processos tudo em tempo real por meio de uma extensão à internet do sistema SCADA-HMI Global (Figura 4.6). Para essa finalidade, os computadores dispostos no sistema SCADA-HMI Global, contarão com ferramentas para o acesso remoto aos dispositivos via internet (Pina, 2009).

O Software LabVIEW, por exemplo, é um interessante instrumento para alcançar esse objetivo, dadas as funcionalidades de comunicação com a Internet por meio de uma ferramenta denominada *Web Publishing Tool*, que permite criar uma página web em HTML com os painéis de controle embutidos. O LabVIEW também conta com uma ferramenta chamada *DataSocket* que permite a transmissão de dados a altas velocidades e de forma segura para vários clientes remotos simultaneamente, administrando a segurança, permissões e restringindo o acesso de pessoas não autorizadas (Baccigalupi et al., 2006).

Também o Software Elipse SCADA através do *plug-in* Elipse Web, pode gerar documentos para serem visualizados pela Internet, em conjunto com algum servidor web comercial, como a *Internet Information Services* ou o *Microsoft Personal Web Server* (Schaf, 2006).

Futuramente, a arquitetura *Smart  $\mu$ Grid* proposta deverá integrar-se com uma rede WAN e formar parte da nova visão do sistema elétrico inteligente. Para atingir esse objetivo existem diversos caminhos possíveis. Quanto à camada física, poderão ser utilizados diversos meios de transmissão compatíveis com a rede Ethernet Powerlink, tais como: PLC, GPRS, Fibra Óptica e Par Trançado.

Poderão ser utilizados vários meios ao mesmo tempo já que, conforme o modelo conceitual de *Smart Grid* proposto pela norma NIST, Figura 4.8, diferentes mensagens com diferentes requisitos de latência serão transmitidas a diferentes receptores e recebidas de diferentes transmissores. Assim, por exemplo, pretende-se receber sinais de preço e sincronismo do período de integração, provenientes da concessionária de energia elétrica, as quais possuem estritos requisitos de latência e necessitam um meio rápido e seguro, sendo uma opção possível um canal de fibra óptica. Também pretende-se enviar informações de

qualidade de energia e sugestões à agência reguladora, informações que possuem menor requisito de latência e permitem a utilização de uma tecnologia sem fio, por exemplo.

## 4.4 Funções da Rede

A arquitetura *Smart  $\mu$ Grid* proposta permitirá realizar um grande número de funções que poderão ser ampliadas periodicamente, e que contribuirão para a realização de diversas atividades do SGIE proposto no Capítulo 2, entre elas:

- Monitoramento em tempo real;
- Controle de consumo;
- Controle de demanda;
- Controle do fator de potência das cargas elétricas;
- Gerenciamento da energia gerada internamente, através dos geradores distribuídos dentro do parque;
- Gerenciamento de elementos armazenadores;
- Integração de veículos elétricos com a rede elétrica interna;
- Realização, de maneira dinâmica e automática, da reconfiguração do arranjo de conexões dos circuitos monofásicos ligados à rede de distribuição;
- Acionamento de alarmas;
- Outras funções tais como rotinas de determinadas horas, rotinas de fins de semana e feriados;
- Atender a fins didáticos.



Figura 4.8: Modelo Conceitual Smart Grid Proposto Pela Norma NIST. Fonte: Nist Release 1.0 (2010).

A seguir serão descritas brevemente algumas dessas funções, porém seus detalhes técnicos de implementação estão fora do escopo deste trabalho.

#### **4.4.1 Monitoramento em Tempo Real**

A etapa de instalação do SGIE, conforme descrito no Capítulo 2, requer da definição de uma “Infraestrutura de Medição e Monitoramento”. Para atender essa necessidade de gestão fundamental, a arquitetura de rede proposta conta com uma infraestrutura AMI, mediante a qual serão realizadas tanto medições globais como locais de diversos portadores energéticos. Para tanto, serão utilizados medidores inteligentes, como os descritos no capítulo anterior, assim como diversos sensores e circuitos eletrônicos de medição local, esses últimos poderão ser fabricados no próprio parque.

A infraestrutura AMI possibilitará a medição e aquisição de uma grande quantidade de dados, que serão encaminhados mediante os meios de comunicação a controladores que os utilizarão como entrada de seus algoritmos e assim calcularão os seus sinais de saída sobre os dispositivos de atuação.

Todos esses dados medidos e os estados dos diversos dispositivos de atuação e os sinais de saída dos dispositivos de controle poderão ser monitorados em tempo real, seja por meio de displays dispostos nos vários controladores distribuídos como também e, principalmente, através dos sistemas SCADA-HMI (Figura 4.6).

Mediante o SCADA-HMI Global, os usuários autorizados podem ter acesso e verificar estados dos equipamentos de cada sala, estados de geradores distribuídos, atividades da plataforma de integração com veículos elétricos, quantidade de energia sendo utilizada, áreas de consumo, percentagem sendo consumida em cada setor, tipo de portador energético sendo utilizado, históricos de consumo, previsão de demanda, parâmetros estatísticos e indicadores de gestão de todo o parque. Por outro lado, o SCADA-HMI Local permite o acesso a esses parâmetros dentro do respectivo bloco.

Através destas ferramentas de monitoramento também poderá ser visualizada a qualidade da energia, tanto daquela adquirida quanto da gerada internamente e também os distúrbios de qualidade causados por processos internos. Para atender essa finalidade ambos os sistemas SCADA-HMI contarão com ferramentas de instrumentação virtual que auxiliem as medições locais efetuadas no Nível de Campo.

#### **4.4.2 Controle de Demanda em Tempo Real**

Dentre as ações de otimização estabelecidas no SGIE, será efetuado um controle de demanda, baseado na modalidade tarifária na qual está enquadrada ou na que poderia estar enquadrada a organização. Para tanto será efetuada a atuação sobre as cargas, de forma tal a

não ultrapassar a demanda contratada, sendo esta integralizada em períodos de quinze minutos (Roja, 2009; Neusser, 2009).

Para atender o requisito anterior, o Controlador Central receberá informações de preços e de sincronismo do medidor global de energia elétrica da concessionária, e também informações dos medidores colocados nos geradores distribuídos, conforme o ilustrado na Figura 4.6.

Com essas informações o equipamento tomará uma decisão de quanta energia total poderá ser consumida nesse intervalo de integração e decidirá quanto desta energia poderá ser consumida em cada bloco do parque. Para este fim, cada bloco terá um nível de prioridade, dependente do tipo de carga nele existente, como, por exemplo, alguns blocos poderão consumir 10% da energia total, outros 5% etc. Este nível de prioridade não necessariamente deverá ser fixo para cada período de integração, podendo ser reconfigurado por um usuário mediante o SCADA-HMI Global ou então calculado por algum algoritmo implementado no Controlador Central.

Uma vez que os controladores do Nível de Controle de cada bloco recebam as informações de quanta energia poderão consumir no respectivo intervalo de integração, decidirão que porção dessa energia poderá ser consumida em cada sala interna e enviarão esses dados de consumo aos controladores escravos do Nível de Campo. Cada sala também terá um nível de prioridade associado, que não necessariamente deverá ser fixo, podendo ser configurado por pessoal autorizado mediante o sistema SCADA-HMI Local ou então calculado por algoritmo via software implementado no controlador mestre do bloco.

Uma vez que o controlador escravo recebe as informações de quanta energia poderá utilizar, atuará sobre as cargas presentes na sala para não ultrapassar essa quantidade designada. Para atingir esse objetivo será realizada uma priorização de cargas a serem desligadas. Aquelas cargas com menor influência no processo produtivo serão as primeiras a serem desligadas e as últimas a serem religadas.

Também cada carga será classificada segundo seus requerimentos de tempo mínimo que deverá permanecer ligada e tempo mínimo que deva permanecer desligada. A priorização do desligamento de cargas também pode ser uma função de resultados medidos por sensores, por exemplo, com temperaturas medianamente aceitáveis a primeira carga a se desligar poderia ser o ar condicionado.

Para reduzir o desligamento de cargas por controle de demanda, o CLP mestre de cada bloco, periodicamente, interrogará os seus escravos para saber se não há alguns conjuntos de salas que necessitem menos energia da que lhe foi atribuída, enquanto que outras necessitem mais. Caso afirmativo, as salas que tiverem excesso de energia “doarão” parte da sobra para as salas que necessitem desligar cargas.

Da mesma forma o “Controlador Central” interrogará periodicamente os controladores distribuídos nos blocos para verificar se alguns estão consumindo menos energia do que lhes

foi atribuída, enquanto que em outros esteja faltando. Caso afirmativo, os blocos com energia em excesso doarão parte do excedente para os blocos que necessitem desligar cargas.

Dessa forma pode ser feito um ajuste dinâmico da energia atribuída a cada setor segundo suas necessidades e assim se evitará o desligamento de carga e se aumentará a produção.

Como método de segurança, se o controlador mestre do bloco perder comunicação com algum de seus escravos, além de acionar um alarme indicando o problema, deverá comparar o pacote de energia que lhe foi atribuído pelo Controlador Central com a integração até o fim do período de 15 minutos da potência instantânea recebida de seu medidor local. Caso essa última for maior que a primeira, o desligamento de cargas deverá ser reconfigurado.

O controle de demanda depende excessivamente do Controlador Central, por isso, como outro método de segurança caso algum bloco não receba os dados necessários para o controle local da demanda, além de acionar alarmes indicando tal inconveniente, também efetuará o controle usando os mesmos dados correspondentes ao mesmo dia e hora da semana anterior, até o momento que se recupere a comunicação com este equipamento.

O algoritmo de controle de demanda nunca deve ligar uma carga que tenha sido desligada pelo algoritmo de controle de consumo, no entanto poderá desligar uma carga que tenha sido ligada por ele.

#### **4.4.3 Controle de Consumo em Tempo Real**

Complementando o controle anterior, outro método a ser implementado é o controle de consumo, com a finalidade de reduzir perdas e consumos que não contribuem para a produção.

As tarefas de controle de consumo estarão, principalmente, implementadas no Nível de Campo. Os controladores escravos de cada sala ou conjunto de salas realizarão tarefas como: desligar aparelhos de ventilação e ar condicionado em ausências de pessoas nas salas, abrir cortinas e apagar aparelhos de iluminação, quando se puder aproveitar a iluminação natural, e desligar aparelhos de ar condicionado, quando se detectar uma temperatura adequada. Para atender estas finalidade podem ser utilizados sensores, medidores locais e interruptores comunicados com o controlador, principalmente baseados nas tecnologias ZigBee e Bluetooth, que possuem boas características de desempenho dentro de redes de curta distância.

Também serão implementadas atividades de controle de consumo no Nível de Gerenciamento, entre elas: aperfeiçoamento da utilização de geração distribuída, suavização da curva de demanda mediante a utilização e gerenciamento de dispositivos de armazenamento de energia, integração da rede com veículos elétricos e atenção a tarefas pré-programadas, como desligar cargas durante a noite, desligar setores durante fins de semana e feriados, entre outras.

O algoritmo de controle de consumo nunca deve ligar uma carga que tenha sido desligada pelo algoritmo de controle de demanda, porém poderá desligar uma carga que tenha sido ligada por ele.

#### 4.4.4 Controle de Fator de Potência

O fator de potência será corrigido tanto em forma local como global. As correções locais serão implementadas nos controladores do Nível de Campo dispostos nas salas que possuem considerável carga indutiva. As medições serão feitas por medidores inteligentes, ou bem por meio de circuitos eletrônicos construídos no próprio parque, os quais, mediante medições de corrente e tensão, estimarão o fator de potência via software implementado em um microcontrolador e, com base nos resultados medidos, atuarão sobre bancos de capacitores para manter o fator de potência nos limites estabelecidos pela legislação. As correções globais serão realizadas com base nos dados medidos pelo medidor global de energia elétrica.

#### 4.4.5 Gerenciamento dos Recursos Energéticos Distribuídos

Cada gerador distribuído terá um sistema de proteção e um sistema de controle e monitoramento efetuado por um controlador escravo, que comunicará as disponibilidades de geração ao Controlador Central (mestre) mediante uma comunicação Wi-Fi ponto–multiponto. Este último decidirá o destino dessa energia disponível, que poderá ser:

- Utilizada internamente para a alimentação das cargas;
- Guardada em elementos armazenadores;
- Vendida à rede pública.

Os geradores distribuídos, junto com os sistemas de armazenamento, poderão fazer com que a *Smart  $\mu$ Grid* opere de forma ilhada durante períodos de falta de energia proveniente da rede pública. Para atender esta finalidade é necessário que os respectivos sistemas de controle não dependam da energia da rede pública para a sua alimentação, já que, nessa situação, toda a geração distribuída seria desligada durante as horas de corte de energia, sendo que é neste preciso momento que essas fontes locais podem oferecer o seu maior valor, prestando serviços de alimentação das cargas locais (Huayllas et al., 2011).

Além de operar de forma isolada, a *Smart  $\mu$ Grid* também terá um ponto de conexão comum (PCC) com a rede pública, com capacidade de manobra manual e automática, no qual interruptores inteligentes permitirão um rápido isolamento da *Smart  $\mu$ Grid* fazendo-a funcionar de maneira isolada durante períodos de elevada geração interna.

Mediante um acordo com a concessionária, poderá comercializar os excedentes. Porém, a comercialização de excedentes não dependerá somente das disponibilidades internas, mas

também das condições do mercado elétrico. Dependendo do preço, o sistema decidirá se armazenar ou vender a energia excedente (Villalba, 2003; Kirschen, 2003).

No momento de isolar a rede, os controladores dos microgeradores passam a controlar a frequência da seção isolada e manterão a tensão e os níveis adequados de frequência para todas as cargas.

As funções de proteção dos geradores também serão executadas pelo sistema de controle, porém, para atender os requisitos de tempo necessários para essa operação, tais decisões serão realizadas de forma independente do Controlador Central, atendendo os requisitos da norma IEC 61850. No entanto, este último deverá ser comunicado, de forma vertical por meio da rede Wi-Fi, dos estados dos sistemas de proteção e as ocorrências de falhas.

#### 4.4.6 Implantação de Elementos Armazenadores

A implantação dos elementos armazenadores é realizada com o objetivo de suavizar a curva de demanda ao longo do dia, constituindo uma estratégia que forma parte do SGIE.

Essa técnica consiste em realizar o carregamento de um sistema de armazenamento elétrico, neste caso um banco de baterias, durante as horas de baixa demanda (fora de ponta). Uma vez que as baterias estejam carregadas, sua energia poderá ser fornecida à rede para abastecer parte da potência demandada durante as horas de maior demanda (ponta), reduzindo dessa maneira a energia que deveria ser fornecida pela rede.

Por outro lado, a energia das baterias também será utilizada na forma de corrente contínua para alimentar todos os equipamentos eletrônicos da *Smart  $\mu$ Grid* para que estes não deixem de funcionar por falhas na rede da concessionária.

Para efetuar estas operações, o controlador local do banco de baterias informa o estado das baterias ao Controlador Central, e este é quem decide quando e onde será utilizada a energia disponível, enviando uma ordem ao controlador local para carregar as baterias ou então fornecer sua energia à rede ou, ainda, não fazer nada. A comunicação entre o controlador local e o Controlador Central é realizada por meio de uma rede Wi-Fi, conforme ilustra a Figura 4.6.

O controlador local contará com uma unidade de potência encarregada de fazer a retificação e filtragem da energia da rede utilizada para carregar as baterias, e a conversão CC-AC da energia armazenada nas baterias a ser fornecida à rede, atendendo os níveis de tensão e frequência necessários. Também fará um adequado controle da corrente de carga e interromperá o processo de carregamento quando identificar algum problema ou bem quando as baterias estiverem completamente carregadas.

É importante notar que existem no mercado dispositivos capazes de fazer inversão e retificação, integrados em um mesmo equipamento. Entretanto, é importante estudar a

possibilidade de utilizar a corrente contínua para alimentar determinadas cargas, evitando desta maneira fazer a conversão da corrente contínua, fornecida pelos bancos de baterias, para corrente alternada, para utilizar na rede elétrica do parque.

#### **4.4.7 Plataforma de Integração com Veículos Elétricos**

Outra atividade contemplada no SGIE será a integração da rede elétrica local com veículos elétricos com o objetivo de incentivar o mercado de energia e suavizar a curva de demanda ao longo do dia.

O Parque Tecnológico Itaipu conta com duas praças de estacionamento nas quais existem plataformas de integração com veículos elétricos. Estas plataformas ainda não disponibilizam um sistema de controle e monitoramento em tempo real que permita a interface com proprietários dos veículos, haja vista que estes pertencem somente à própria Itaipu. É necessário que a plataforma informe periodicamente a energia disponível na bateria, o preço para a compra e para a venda. O preço poderá ser informado pelo Controlador Central, em função do preço da energia da concessionária, da disponibilidade de geração interna e da demanda local, e será comunicado ao sistema de controle local por meio da rede Ethernet.

O controlador local estará munido de um menu de opções, onde o cliente poderá definir parâmetros como taxa de carga (rápido, lento, médio), tempo de carregamento e quantidade de energia requerida. Também poderá disponibilizar os parâmetros da bateria, como capacidade, estado de carga, química da bateria, nível de tensão em circuito aberto, temperatura etc.

O sistema de controle irá atribuir potência a cada veículo em função dos parâmetros inseridos pelo cliente, visando otimizar a taxa de carga (estabilização), e cortará automaticamente o processo de carregamento quando as baterias estão completamente carregadas, ou quando ocorrer um inconveniente no processo de carregamento, e informará estas decisões ao proprietário do veículo.

A plataforma também terá um medidor local, com capacidade de medição bidirecional, desse modo os proprietários dos veículos também poderão vender energia para a rede nos momentos que acharem conveniente, colaborando dessa maneira para uma suavização da curva de demanda ao longo do dia.

#### **4.4.8 Acionamento de Alarmes**

A *Smart  $\mu$ Grid* poderá acionar diversos alarmes para anunciar ocorrências de eventos tais como: corte de energia elétrica da concessionária, falta de combustível, mal funcionamento de equipamentos, baixa qualidade da energia comprada e gerada internamente e distúrbios na rede e nos processos. Estes alarmes podem ser programados para acenderem

luzes de emergência ou sons nas principais salas do pessoal de manutenção, ou também enviadas por mensagens aos celulares de pessoas indicadas através do ponto de acesso GPRS.

Neste tópico é interessante notar que a maioria das ações automáticas tomadas pela *Smart  $\mu$ Grid* dependem do Controlador Central, sendo ele o coração da rede. Assim, se algum dispositivo não receber no tempo esperado os dados provenientes desse equipamento, deve entender que ele saiu de funcionamento e automaticamente acionar alarmes em diversos locais, e também enviar mensagens aos celulares comunicando tal falha da rede e, quando o funcionamento for recuperado, enviar uma mensagem indicando a volta da condição normal.

#### **4.4.9 Reconfiguração Automática do Arranjo de Conexões dos Circuitos Monofásicos**

Mediante as medições dos valores de potência em cada fase, efetuadas pelo medidor global de energia da concessionária, o Controlador Central poderá solicitar a determinados CLPs mestres dos blocos, a realizarem uma alteração dinâmica e automática de seus circuitos monofásicos, comutando suavemente seus circuitos de uma fase para outra, permitindo a reconfiguração do arranjo de conexões dos circuitos monofásicos ligados à rede de distribuição. Desta forma é possível efetuar uma proteção a sobrecargas e reduzir perdas por desbalanceamento entre as fases do transformador.

Esta comutação deverá ser realizada em intervalos inferiores a um ciclo do sinal da rede para evitar a inserção de harmônicos na mesma e cortes de fornecimento de energia ou danos às cargas comutadas (Gomes et al., 2010).

### **4.5 Estado Atual da Smart $\mu$ Grid no Parque Tecnológico Itaipu**

Da mesma maneira que uma *Smart Grid* se forma a partir da interligação de diversas *Smart  $\mu$ Grid*, assim também um a *Smart  $\mu$ Grid* forma-se a partir da construção e interligação de diversas sub-redes. Assim, pretende-se chegar ao modelo *Smart  $\mu$ Grid* proposto para o Parque Tecnológico Itaipu de forma incremental, primeiramente construindo alguns Níveis de Campo em algumas salas ou conjunto de salas de um dos blocos e depois interligando estes Níveis de Campo para formar um primeiro Nível de Controle dentro de um dos Blocos. A seguir, irá sendo implementada a mesma metodologia em outros Blocos. No momento que dois ou três blocos já tenham construído suas sub-redes, estes serão interligados através da rede Ethernet, formando o Nível de Gerenciamento, ao qual outros blocos irão se aderindo de forma paulatina. Em paralelo se trabalhará com a geração distribuída e com as plataformas de interface com veículos elétricos e dispositivos de armazenamento.

Portanto, a *Smart  $\mu$ Grid* proposta para o Parque Tecnológico Itaipu é um projeto de longo prazo, requerendo diversos trabalhos de pesquisa e implementação. Porém, pode se dizer que ela já nasceu, embora atualmente encontra-se em uma fase inicial, tendo instalada uma rede de par trançado ao longo do parque e realizando ensaios de aquisição de dados utilizando medidores e aplicativos avançados. Também já estão sendo realizados trabalhos de pesquisa orientados à inserção de geração distribuída na rede e trabalhos referentes à comercialização de energia. A Figura 4.9 mostra uma das primeiras unidades de medição inteligente instalada em um dos transformadores do PTI, os dados supervisionados são enviados a um processador munido de uma HMI (Figura 4.10) que permite a visualização dos dados presentes e históricos, desenvolver aplicativos e fazer um seguimento de indicadores de gestão energética.

Pretende-se continuar com a construção desta arquitetura *Smart  $\mu$ Grid* conforme a proposta dada neste trabalho, a qual será continuamente atualizada pelo pessoal capacitado no laboratório vivo.



Figura 4.9: Multimetro UPD-200 instalado em um transformador do PTI.



Figura 4.10. Sistema para conversão, aquisição e processamento de dados junto com uma HMI.

#### 4.5.1 Conclusão

A *Smart  $\mu$ Grid* proposta para o Parque Tecnológico Itaipu admite uma integração de diversas tecnologias e possibilita a fácil expansão, tanto do ponto de vista físico quanto funcionais, garantindo flexibilidade para essa expansão.

O uso da rede Ethernet Powerlink permite tomar decisões em tempo real, facilitando atender aos estritos requisitos de latência requeridos pelas principais aplicações da *Smart  $\mu$ Grid*, e também facilitando a integração da rede à internet e a *Smart Grid* do futuro.

Além de atender diversas necessidades da gestão integral da energia, o modelo *Smart  $\mu$ Grid* proposto também atende necessidades acadêmicas e funcionará como um laboratório vivo, no qual alunos de graduação e pós-graduação apreenderão conceitos de *Smart  $\mu$ Grid*, atuando sobre ela. Desta forma é possível formar redes de conhecimento constituídas por pessoas capacitadas em novas tecnologias, com competência de analisar o entorno e projetar cenários futuros nos aspectos referentes à *Smart  $\mu$ Grid* e inovadoras técnicas de gestão da energia, para logo aplicar os conhecimentos adquiridos na manutenção desta *Smart  $\mu$ Grid*, em contínuo desenvolvimento, ou seja, em um estado “vivo”.

# Capítulo 5

## Conclusão

A implementação de um SGIE em uma organização constitui um excelente conjunto de ferramentas para aperfeiçoar o uso da energia em suas diferentes formas. O mesmo fornece às unidades consumidoras a possibilidade de produzir mais com menos recursos e menos esforços, além de aumentar o conforto para os trabalhadores e clientes. Assim, contribui com o aumento da competitividade da organização e com a conservação do meio ambiente, seja através da redução no consumo ou pela utilização de fontes renováveis de energia.

O presente trabalho descreve um modelo que permite implementar um SGIE, para logo focalizar no uso das tecnologias para atender determinadas etapas da sua implementação e operação. Como o SGIE está ambientado nas instalações do Parque Tecnológico Itaipu, o qual possui vários centros de carga e recursos de geração de pequeno porte interligados através de uma microrrede, foi proposta uma arquitetura física e lógica capaz de transformar essa microrrede em uma *Smart  $\mu$ Grid*.

A *Smart  $\mu$ Grid* permite atender varias etapas de um SGIE, facilitando uma administração inteligente e integral dos recursos, tornando possível considerar o efeito que a atuação sobre uma determinada unidade produz nas outras unidades do sistema. Ao mesmo tempo em que contribui para o aumento do conforto, confiabilidade e segurança das instalações fornecendo previsão e correção automática de falhas, acionamento de alarmes de mau funcionamento, tanto na rede elétrica quanto nos processos produtivos.

A *Smart  $\mu$ Grid* aumenta as possibilidades de comercialização da energia mediante opções tais como, integração de veículos elétricos com a rede de energia elétrica, gestão integral da geração interna, comercialização de excedentes e supervisão da qualidade da energia comercializada. Ainda facilita o desenvolvimento de aplicativos que permitem executar diferentes funções tais como: medição e registro de dados do fluxo de energia, monitoramento e controle integral dos REDs, previsão de demanda, atenção a requerimentos de contratação com fornecedores de energia e tratamento de dados em tempo real com o objetivo de identificar tendências e aplicar ações corretivas e preventivas.

A instalação de uma *Smart  $\mu$ Grid* é uma tarefa contínua de aperfeiçoamento, sobre ela é possível periodicamente projetar novos cenários. Devido a este fato, e à grande diversidade de tecnologias em continua evolução que viabilizam a sua construção, é necessário um grande esforço de planejamento inicial que possibilite a implantação de um sistema robusto e flexível, permitindo a fácil expansão e a interoperabilidade entre diversas tecnologias.

O trabalho mostra que é possível construir uma arquitetura tipo *Smart  $\mu$ Grid* capaz de atender varias etapas de um SGIE, e ainda propiciar a interoperabilidade tecnológica que permita integrar diversos equipamentos de diversos fabricantes. Essa compatibilidade, além de facilitar a sua expansão, seja para atender novas aplicações ou para cobrir maiores áreas, também provê a possibilidade de interligar diferentes redes, tanto ligadas por fios como também redes *wireless*. Essa diversidade tecnológica enriquece o funcionamento de um laboratório vivo, destinado à formação de pessoal nos conceitos de *Smart Grid*, que será beneficiado com diversos objetos de estudo, onde poderão ser observados, examinados e comparados os desempenhos das diversas tecnologias interligadas. Tudo isso atendendo os estritos requisitos de latência demandados por diversas funções da *Smart  $\mu$ Grid*.

O trabalho também mostra que a viabilização de uma *Smart  $\mu$ Grid* ainda pode contribuir para outras atividades internas de uma organização, como por exemplo, ativar alarmes de incêndio, identificar intrusos em áreas reservadas, prover assistência de comunicação entre o pessoal, controlar máquinas, dentre outras.

### 5.1.1 Trabalhos Futuros

Sendo a *Smart  $\mu$ Grid* um projeto de muitos projetos, ainda há muitos trabalhos a serem realizados. Entre eles, primeiramente pretende-se implementar um modelo em pequena escala em um dos blocos do PTI, tornando já um ambiente de laboratório, de forma tal de realizar alguns estudos de campo, capacitar pessoal e logo ir expandindo suas aplicações tanto para cobrir maiores áreas como para atender maiores funções, até conseguir construir toda a arquitetura *Smart  $\mu$ Grid* proposta neste trabalho. Para essa finalidade, também é necessário desenvolver algoritmos matemáticos destinados a otimizar a administração dos recursos energéticos e estudar as metodologias para a inserção dos diversos tipos de geração distribuída na rede de energia elétrica.

Também pretende-se que futuramente a *Smart  $\mu$ Grid* do PTI seja interligada a uma rede de área ampla e forme parte de uma nova visão do sistema elétrico, a *Smart Grid*. Porém, esse novo paradigma do sistema elétrico inteligente, por sua parte, também requer de diversos trabalhos nos mais diversos setores.

No que se refere ao sistema de distribuição, devem ser inovados os sistemas de proteção e controle a fim de suportar um fluxo bidirecional de energia. Enquanto ao mercado de energia, devem ser estudados os requisitos necessários e as estratégias para participar ativamente no mercado da energia elétrica e vender excedentes para a rede de energia elétrica da concessionária.

Na filosofia de *Smart Grid* é possível e desejável implementar sistemas de monitoramento e controle em tempo real em todos os setores do sistema elétrico, e adquirir informações sobre o estado dos diversos equipamentos (níveis de tensão, temperaturas dos cabos, estados dos disjuntores, carregamento de transformadores, magnitude e direção do fluxo de potência). Estes sistemas necessitarão a interconexão de um grande numero de

medidores e sensores, que irão gerar uma enorme quantidade de dados, que deverão ser processados e transformados em informações úteis. Portanto, será necessário estender as capacidades dos sistemas SCADA atuais para atender essas necessidades e controlar todos os dados coletados.

Também devem ser projetados sistemas de comunicação bidirecionais entre concessionária, consumidores, mercado, operador e prestadores de serviços, a fim de efetuar leitura de demanda de consumidores individuais e disponibilidade do preço da energia em tempo real para os consumidores, assim como indicadores da qualidade da energia comercializada para o operador do sistema.

Essa nova concepção do sistema elétrico o deixará dependente dos sistemas de comunicação e, portanto, deverão ser estudados e implementados métodos que forneçam segurança nas comunicações, de modo a garantir uma troca de informações seguras e evitar que pessoas não autorizadas acessem aos sistemas, e modifiquem os processos, ou então obtenham informações confidenciais.

Outro aspecto a ser considerado será o estudo de sistemas de segurança contra ataques cibernéticos. Uma *Smart  $\mu$ Grid* é capaz de conectar o chão de fábrica com o ambiente de escritório. Apesar de que um ambiente de escritório pode continuar a funcionar enquanto se removem vírus do sistema, o ambiente de fábrica teria que ser desligado. Ataques internos ou externos poderiam custar à empresa grandes perdas em tempo parado e má gestão dos recursos.



# Referências Bibliográficas

- ABNT NBR ISO 50001. (2011) – Sistemas de gestão da energia – Requisitos com orientações para uso. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas. 27 p.
- Aguirre, L. A. (1 eds.) (2007). *Enciclopédia de Automática: Controle e automação*, Blucher, São Paulo.
- Alcântara, M. V. P. (2011). Microrredes inteligentes: um novo modelo de negócio para a distribuição de energia elétrica, *O Setor Elétrico* 71: 36-45.
- Alfonso, G. I. T. (2010). *Control predictivo híbrido para gestión de demanda eléctrica*, Dissertação de mestrado, Pontificia Universidad Católica de Chile, Escuela de Ingeniería, Santiago de Chile, Chile.
- Antonio, J. H. (2007). *Controle e otimização do fator de carga*, Monografia de graduação em Engenharia de controle e Automação, Universidade Federal de Ouro Preto, Colegiado Curso de Engenharia de controle e Automação – CECAU, Ouro Preto, Brasil.
- Arzuaga, A., Arzuaga, T. and Salat, J. (2011). Smartgrid communications LAN/WAN design for reliability & operability, *Pac World*, pp. 47-51.
- Avella, J. C. C., Figueroa, E. L., Stand L. M., Ospino, I. T., Gómez, A. N., Oqueña, E. C. Q., Medina J. R. V., Castrillón Y. L. and Mendoza, R.C. (2008). Guía para la implementación de un sistema de gestión integral de la energía, *Universidad del Atlántico e Universidad Autónoma del occidente*, Colombia.
- Baccigalupi, A., Capua, C. de and Licardo, A. (2006). Overview on development of remote teaching laboratories: from LabVIEW to web services, *IEEE IMTC - Instrumentation and Measurement Technology Conference*, Sorrento, Italia, pp. 992-997.
- Bajpai, P. and Singh, S. N. (2004). Electricity trading in competitive power market: An Overview And Key Issues, *IEEE ICPS - International Conference on Power Systems*, Kathmandu, Nepal, pp. 571-576.
- Bardo, S. (2010). *Almacenamiento distribuido en viviendas para alisar la curva de demanda de energía eléctrica*, Dissertação de mestrado, Universidad Politecnica de Catalunya, Departamento de Ingeniería Electrónica, Catalunya, España.
- Barriá, C. and Rudnick, H. (2007). Investment under uncertainty in power generation: integrated electricity prices modeling and real options approach, *IEEE Latin America Transactions* 9 (5): 785-792.
- Berglund, J., Michaloski, J., Leong, S., Shao, G., Riddick, F., Arinez, J. and Biller, S. (2011). Energy efficiency analysis for a casting production system, *Winter Simulation Conference*, Phoenix, pp. 1060- 1071.

- Berlanda, J. (2010). Informática industrial computador industrial e sistemas SCADA, *Relatório técnico*, Faculdade Assis Gurgacz coordenação de engenharia de controle e automação, Cascavel, Brasil.
- Bobba, R. B., Dagle, J., Heine, E., Khurana, H., Sanders, W. H., Sauer, P. and Yardley, T. (2012). Enhancing grid measurements, *IEEE power & energy magazine* 10 (7): 67-73.
- Kamada, M. M. and Boeira, M. V. (2011). Análise de modalidades tarifárias e suas aplicações para smart grids, Trabalho de conclusão de curso, Universidade Federal do Paraná,
- Bossel, U. (2006). Does a Hydrogen Economy Make Sense?, *IEEE Journals*, 94 (10):1826-1837.
- Bouhafs, F., Mackay, M. and Merabti, M. (2012). Links to the Future Communication Requirements and Challenges in the Smart Grid, *IEEE power & energy magazine* 10 (1): 24-32.
- Brown, A., Salter, R. (2011). Can Smart Grid Technology Fix the Disconnect Between Wholesale and Retail Pricing?, *Elsevier The Electricity Journal* 24 (1): 7-13.
- Brunner, C. (2011). IEC 61850 and Smart Grids, *Pac World*, pp. 27.
- Caicedo, O. F. and Oqueña, E. C. K. (2008). Guía para la implementación de sistema de gestión integral de la energía, *Universidad del Atlántico e Universidad Autónoma del Occidente*.
- Carvajal, M. C. and Pérez, L. A. S. (2008). Diseño e implementación de un sistema de adquisición de datos y su interface con una red central de datos en la empresa acerías del ecuador C.A. (ADELCA), *IET – Tesis Electrónica y Telecomunicaciones*, Quito, Ecuador.
- Chaves, F. D. M. (2009). *Serviços ancilares através da geração distribuída: reserva de potência ativa e suporte de reativos*, Tese de doutorado, Universidade Estadual de Campinas Faculdade de Engenharia Mecânica, Campinas, Brasil.
- Choi, C., Han, J., Park, W., Jeong, Y. and Lee, I. (2011). Proactive energy management system architecture interworking with smart grid, *IEEE - 15th International Symposium on Consumer Electronics*, pp. 621-624.
- Dugan, R. C. and Granaghan, M. (2011). Sim City Model-Based Distribution Management, *IEEE power & energy magazine* 9 (5): 74-81.
- Ethernet POWERLINK Standardisation Group (2008). Communication Profile Specification, Berlin, Germany.
- Faccioni, A. U., Triches, L. M. and Macedo, R. L. (2008). Analysis on technology plc(power line communication), *E-Tech - Tecnologias para Competitividade Industrial* 1 (2): 54-74.
- Falcão, D. (2010). Integração de Tecnologias para Viabilização da smart grid, *SBSE - III Simpósio Brasileiro de sistemas elétricos*, Belém PA, Brasil.

- Flipe, D. P. (2009). Medição eletrônica inteligente, APTTEL SNT - *X Seminário Nacional de Telecomunicações*, Rio de Janeiro, Brasil.
- Gao, J., Xiao, Y., Liu, J., Liang, W. and Chen, C.L.P. (2011). A survey of communication/networking in Smart Grids, *Elsevier Future Generation Computer Systems* 28 (2): 391-404.
- Gellings, C. W., Samotyj, M. and Howe, B. (2004). The future's Smart Delivery System: Meeting the demands for high security, quality, reliability, and availability, *IEEE power & energy magazine* 2 (5): 40-48.
- Ghosh, A., Majumder, R., Ledwich, G. and Zare, F. (2009). Power quality enhanced operation and control of a microgrid based custom power park, *IEEE ICCA - International Conference on control and Automation*, Christchurch, pp. 1669-1674.
- Gomes, F. E. (2003). *Soluções em automação para eficiência energética*, Monografia de Graduação, Universidade Federal de Goiás Escola de Engenharia Elétrica, Goiânia, Brasil.
- Gomes, R. C., Printes, A. L. and Ramos, C.M. (2010). Proposta de Sistema com Arquitetura para Implementação de uma Smart Grid na Rede de Distribuição em Baixa Tensão, SBSE - *III Simpósio Brasileiro de sistemas elétricos*, Belém PA, Brasil.
- Gonçalves, P. H. (2010). Ethernet adaptado a aplicações de Tempo real, *Relatório técnico*, Mestrado em Controle e Electrónica Industrial, Instituto politécnico de pomar.
- Gordon, M. and Shahidehpour, M. (2011). A living laboratory smart grid education & workforce training at ITT, *IEEE Power and Energy Magazine* 9 (1): 18-98.
- Grenard, S., Devaux, O., Carré, O. and Huet, O. (2011). Power steering advanced distribution applications for operations, *IEEE power & energy magazine*, 9 (5): 42-51.
- Han, D. M. and Lim, J. H. (2010). Design and Implementation of Smart Home Energy Management Systems based on ZigBee, *IEEE Transactions on Consumer Electronics* 56 (3): 1417-1425.
- Huang, H. Y., Yen, J. Y., Chen, S. L. and Ou, F. C. (2004). Development of an intelligent energy management network for building automation, *IEEE Transactions on automation science and engineering* 1 (1): 14-25.
- Huayllas, T. E. C., Ramos, D. D. and Arnes, R. L. V. (2011). *IEEE/PES (T&D-LA) - Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America*, São Paulo, Brasil, pp. 7-12.
- Hull, J., Khurana, H., Markham, T. and Staggs, K. (2012). Staying in Control Cybersecurity and the Modern Electric Grid, *IEEE power & energy magazine* 10 (3): 41-47.
- Hunt, S. (1st eds) (2002). *Making competition work in electricity*, John Wiley & Sons, New York
- Jeon, Y. H. (2011). QoS Requirements for the Smart Grid Communications, *IJCSNS - International Journal of Computer Science and Network Security* 11 (3): 86-94.

- Jiang, L. and Steven, L. (2011). Multi-period optimal energy procurement and demand response in smart grid with uncertain supply, *IEEE CDC-ECC - 50th Conference on Decision and Control and European Control Conference*, Orlando, FL, USA, pp. 4348-4353.
- Kaehler, J. W. M. (2006). Princípios da gestão energética na indústria, *seminário de eficiência energética na indústria*, Campinas, Brasil.
- Keib, R. El and Hammons, T. (2009). International practices in demand side management: Practices and barriers, *IEEE PES General Meeting*, Canada.
- Kirschen, D. S. (2003). Demand-Side View of Electricity Markets, *IEEE Transactions on power systems*, 18 (2): 520-527.
- Kulshrestha, P., Wang, L., Chow, Y. and Lukic, S. (2009). Intelligent Energy Management System Simulator for PHEVs at Municipal Parking Deck in a Smart Grid Environment, *IEEE Power & Energy Society*, pp. 1-6.
- Lamin, H. (2009). *Medição eletrônica em baixa tensão, aspectos regulatórios e recomendações para implementação*, Dissertação de mestrado, Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Brasília, Brasil.
- Lasseter, R. H. and Piagi, P. (2004). Microgrid: A conceptual solution, *IEEE PESC - 35th Power Electronics Specialists Conference*, Madison, pp. 4285-4290.
- Lieber, A. (2010). Las recomendaciones de la Comisión Europea para la eficiencia energética en la industria, *Cegesti Éxito Empresarial*, (156): 1-3.
- Lima, V. O. S. S. (2010). *Estudo de viabilidade da implementação de um medidor com autonomia de energia visando a comunicação wireless do consumo*, Monografia de fim de curso, Universidade Federal de Sergipe Centro de Ciências Exatas e Tecnologia, São Cristóvão, Brasil.
- Lozano, P. C., Pérez, J. M. B., Cervigón, P. D. and Blanco, M. P. (2000). Sistema de control distribuido y supervisión para la instalación de climatización de un edificio, *XXI Jornadas de Automática*, Sevilla, España.
- Marnay, C. and Venkataramanan, G. (2006). Microgrids in the evolving electricity generation and delivery infrastructure, *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, Montreal, pp. 5.
- Melo, T. B., Lima, J. S. and Cardoso, P. K. F. (2010). Sistema de Gerenciamento Pessoal do Consumo de Energia Elétrica. *IEEE/IAS Induscon - IX International Conference on Industry Applications*, São Paulo, Brasil.
- Mohagheghi, S., Tournier, J. C., Stoupis, J., Guise, L., Coste, T., Andersen, C. A. and Dall, J. (2011). Applications of IEC 61850 in distribution automation, *IEEE/PES PSCE - Power Systems Conference and Exposition*, pp. 1-9.
- Morais, H. G. V. (2010). *Gestão de recursos energéticos nas SmartGrids*, Dissertação de mestrado, Instituto Superior de Engenharia do Porto, Portugal.

- Mozina, C. J. (2008). Operating DGs in parallel with utility distribution systems is not without hazards, *Pac World* pp. 20-25.
- Munsuri, A. A., Canals, J. M. A. and Aiartzaguena, M. Z. (2010). Implementation of Telecontrol Applications over GPRS Networks, *Pac World*, pp. 38:43.
- Murilo, F., Fonseca, O. (2010). Desarrollo y síntesis de una red de área local de datos dedicada para tele-medición, *Energética Aplicaciones Industriales* 31 (3): 19-30.
- Navares, C. (2008). Inmótica y eficiencia energética, *Ays Perspectiva Empresarial* (24): 96-98.
- Nazaré, M., Santos, N., Silva, R. D. S., Tostes, M. E. L. and Fadul, R. S. (2009). Software para monitoração e análise de grandezas da qualidade da energia elétrica *CBQEE - VIII Congresso Brasileiro sobre Qualidade da Energia Elétrica*, Blumenau, Brasil.
- Neusser, L. (2009). *Bases teóricas e experimentais para o gerenciamento da demanda em prédios públicos de ensino: o caso da universidade federal de Santa Maria*, Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Tecnologia Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Santa Maria, Brasil.
- NIST Release 1.0. (2010). Framework and Roadmap for Smart Grid Interoperability Standards: National Institute of Standards and Technology. 125 p.
- Nogueira, T. A. (2009). *Redes de comunicação para sistemas de automação industrial*, Monografia de graduação, Universidade Federal de Ouro Preto Escola de Minas Colegiado do Curso de Engenharia de Controle e Automação – CECAU, Ouro Preto, Brasil.
- Nordelo, A. B., Rodríguez, M. L., Yanes, J. M., Teyra, M. A. A., Perez, M.M., Castillo, J. D., Padron, A., Felipe, P. V. and Perez, F. G. (2005). La gestión Energética una alternativa eficaz para mejorar la competitividad empresarial, *Energética* (33): 65-69
- Oliveira, L. F. (2010). Integração de um medidor de energia elétrica à comunicação wireless através de redes zigbee, Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Sergipe, Brasil.
- Pacheco, F. (2006). Energias Renováveis: Breves conceitos, *Economia em destaque, Conjuntura e Planejamento* (149): 4-11.
- Palvacino, C. A., Echeverría, N. G., Estêves, G. J., Reyes, L. and Behnke, R. P. (2011). methodology for community engagement in the introduction of renewable based smart microgrid, *ElSevier Energy for Sustainable Development* 15 (3): 314-323.
- Pascalichio, A. C. (2011). *Perspectiva econômica e modelos de negócios da tecnologia de telecomunicação nas redes de distribuição de energia elétrica no Brasil*, Tese de doutorado, universidade de São Paulo Escola Politécnica Faculdade de Economia e Administração, São Paulo, Brasil.
- Petrovic, B. S. A. (2008). O PAC vai substituir o CLP?, *Mecatrônica Atual*. Acesso em Abril/2012. Disponível em: <http://www.mecatronicaatual.com.br/secoes/leitura/18>.

- Pimpinella, L., Giorgio, A. Di and Mercurio, A. (2010). Local Energy Management System: Control Scheme and Loads Modeling, *IEEE - 18th Mediterranean Conference on Control & Automation Congress Palace Hotel, Marrakech, Morocco*, pp. 304-308.
- Pina, E. G. (2009). Aplicación SCADA basada en comunicación TCP/IP, Relatório Técnico, Universidad Rovira I Virgili Escola Tècnica Superior Enginyeria, Catalã, Espanha.
- Piñero, E. (2009). Future ISO 50001 for energy Management systems. *Focus, Setember*, pp: 18-20.
- Rathnayaka, A. J. D., Potdar, V. M. and Kuruppu, S. J. (2011). An innovative approach to manage prosumers in smart grid, *IEEE Sustainable Technologies (WCST) - World Congress on*, London, pp. 141-146.
- Reis, L. B. Dos and Silveira, S. (2da eds) (2001). *Energia elétrica para o desenvolvimento sustentável: introdução de uma visão multidisciplinar*, Edusp, São Paulo.
- Rocha, L. R. R. and Monteiro, M. A. G. (2005). Guia técnico gestão energética, *PROCEL e Eletrobrás*.
- Roja, J. R. da (2009). *Estudo e desenvolvimento de um sistema automatizado integrado de gestão de energia elétrica – SAIGE*, Dissertação de mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Brasil.
- Saidel, M. A., Gimenes, A. L. V. and Rosa, L. H. L. (2004). Requeriments of an autonomous information system for support to the energy management, *IEEE/PES - Transmission & distribution conference & exposition: Latin America*, pp. 390-395.
- Schaf, F. M. (2006). *Arquitetura para ambiente de ensino de controle e automação utilizando experimentos remotos de realidade mista*, Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul Escola de Engenharia, Porto Alegre, Brasil.
- Silva, A. and Pacheco, J. A. (2008). Transmissão de dados via rede elétrica data communication through the power grid system, *E-Tech - Tecnologias para Competitividade Industrial* 1 (2): 35-53.
- Silva, N. F. J. Da (2007). Internet via rede elétrica, uma solução viável?, *Relatório técnico*, Faculdade Anísio Teixeira Curso De Sistemas Para Internet, Feira De Santana-Ba.
- Sollecito, L. (2008). Grid the road Ahead, *Pac World* pp. 39-44.
- Stallings, W. (7ma eds) (2004). *Comunicaciones y redes de computadores*, Prentice Hall, Madrid.
- Stoll, G. R. (2008). O que é este tal do zigbee?, *UTC Journal - Smart Utilities Networks, Special Issue*.
- Suárez, F. L., D. O., Valencia, D. O., Álvarez, L. A. and Serna, S. (2010). Ethernet y ZigBee para aplicaciones de consumo y administración de la energía, Instituto Tecnológico Metropolitano - *Segundo congreso de microcontroladores y sus aplicaciones*, Medellín, Colombia, pp. 1-10.

- Subirachs, A. C., Alvarez, A. R., Bellmunt, O. G., Figuerola, A. C. and Andreu, A. S. (2010). Control of a utility connected microgrid, *IEEE PES ISGT - Innovative Smart Grid Technologies Conference*, Barcelona, Spain, pp. 1-7.
- Turner, W. C. and Doty, S. (6ta eds) (2006). *Energy Management Handbook*, board, Colorado.
- Villalva, E. G. and Ramos, A. (2003). Optimal Energy Management of an Industrial Consumer in Liberalized Markets, *IEEE Transactions on power systems*, 18 (2): 716-723.
- Wang, W. J., Yang, Q., Yuan, T. and Zahn, M. (2010). A Smart Online Over-Voltage Monitoring and Identifications Systems, *ElSevier Energies* 4 (4): 599-615.
- Wang, W., Xu, Y. and Khnna, M. (2011). A survey on the communication architectures in smart grid, *ElSevier Computer Networks* 55 (15): 3604-3629.
- Wissner, M. (2011). The Smart Grid – A saucerful of secrets?, *ElSevier Applied Energy* 88 (7): 2509-2518.
- Wlas, M., Gackowski, M. and Kolbusz, W. (2011). The Ethernet POWERLINK Protocol for smart grid elements integration, *IEEE ISIE - International Symposium on Industrial Electronics*, Gdansk, pp. 2070-2075.
- Yanes, J. P. M. and Gaitan, O. G. (2005). Herramientas para la gestión energética empresarial, *Scientia et Technical Año XI* (29): 169-174.
- Yorio, O. C. A. Di (2011). *Ampliación y actualización del sistema SCADA del laboratorio de redes de distribución de la escuela de ingeniería eléctrica de la UCV*, Monografía de Graduación, Universidad Central de Venezuela, Caracas, Venezuela.
- Zafar, N., Phillips, E. G. A., Suleiman, H. and Svetinovic, D. (2010). Smart Grid Initiative aims to use the current energy resources, *IEEE EnergyCon - Energy Conference and Exhibition*, Manama, pp. 256-261.