Universidade de São Paulo
Escola Politécnica

CLÓVIS APARECIDO PAULINO

**ESTUDO DE TECNOLOGIAS APLICÁVEIS À AUTOMAÇÃO DA
MEDIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA RESIDENCIAL VISANDO À
MINIMIZAÇÃO DE PERDAS**

São Paulo
2006

CLÓVIS APARECIDO PAULINO

**ESTUDO DE TECNOLOGIAS APLICÁVEIS À AUTOMAÇÃO DA
MEDIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA RESIDENCIAL VISANDO À
MINIMIZAÇÃO DE PERDAS**

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção do Título de
Mestre em Engenharia Elétrica.

**São Paulo
2006**

CLÓVIS APARECIDO PAULINO

**ESTUDO DE TECNOLOGIAS APLICÁVEIS À AUTOMAÇÃO DA
MEDIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA RESIDENCIAL VISANDO À
MINIMIZAÇÃO DE PERDAS**

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção do Título de
Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Sistemas de Potência

Orientador: Prof. Dr. Cícero Couto de Moraes

**São Paulo
2006**

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 16 de novembro de 2006.

Assinatura do autor _____

Assinatura do orientador _____

FICHA CATALOGRÁFICA

Paulino, Clóvis Aparecido

**Estudo de tecnologias aplicáveis à automação da medição de energia elétrica residencial visando à minimização de perdas / C.A. Paulino. – ed.rev. -- São Paulo, 2006.
101 p.**

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas.

1.Distribuição de energia elétrica 2.Furto de energia 3.Perdas de energia (Minimização) 4.Fraude em medidores 5.Concessão de serviço público – Guarulhos (SP) I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas II.t.

Dedicado aos meus pais, que me abriram o caminho, e também à minha família e amigos que tanto me auxiliaram nas horas difíceis, pois sem eles não seria possível realizar este estudo.

AGRADECIMENTOS

A Deus.

Ao Departamento de Energia e Automação da Escola Politécnica da USP pela disponibilidade de infra-estrutura.

Ao Prof. Dr. Cícero Couto de Moraes, pela orientação e principalmente pela oportunidade de aprender com o engenheiro, pesquisador e excelente pessoa.

Ao Doutor Policarpo Batista Uliana, da empresa Documentta, pelas idéias e discussões.

Ao Engenheiro Celso Lellis Garcia, diretor de automação da Ecil Energia.

Ao Engenheiro Paulo Rodrigues Andreus, gerente de desenvolvimento de engenharia da Ecil Energia.

Ao Engenheiro Vagner Santos, desenvolvimento de projetos da Ecil Energia.

Ao Engenheiro Ricardo Rufini, especialista em medição da Bandeirante Energia.

RESUMO

Atualmente a medição de energia elétrica para residências em centros urbanos é realizada por meio de medidores eletromecânicos lidos de forma manual. Neste processo uma série de problemas foram observados, dos quais se destacam: erros de leitura, dificuldade de acesso ao ponto de medição, bancos de dados sem atualização, dentre outros. A automação do processo de medição e da leitura, com base nos medidores existentes ou com o uso de medidores eletrônicos da energia elétrica, além de resolver os problemas citados, tem potencialmente uma série de vantagens, que incluem: combate a fraudes e furto de energia, implementação de tarifas diferenciadas em função da hora de consumo (tarifa amarela), corte e religamento remoto de energia, implementação de programas de energia pré-paga, levantamento de curvas de carga e eliminação de erros e custos do processo de leitura manual.

Por outro lado observa-se que existem no Brasil cerca de 43 milhões de medidores residenciais instalados, sendo relativamente baixos os custos dos medidores eletromecânicos e do sistema de leitura manual. Desta forma, somente será possível implementar sistemas de automação da medição de energia elétrica residencial se os sistemas ora propostos forem ao mesmo tempo de custo reduzido e altamente confiáveis.

O sistema de automação em estudo irá considerar inclusive o aproveitamento dos medidores eletromecânicos existentes, com a instalação de sistemas eletrônicos de coleta dos dados de consumo comunicando-se com concentradores locais, que por sua vez são interligados a sistemas computacionais instalados dentro da concessionária.

Os resultados do estudo mostram que hoje existe uma concreta possibilidade de se obter sistemas de automação da medição de energia elétrica residencial seguros e de custos reduzidos.

O trabalho ora proposto será desenvolver um sistema automatizado para a medição de energia residencial em centros urbanos, constituído por um módulo concentrador para oito residências, com comunicação deste para um centro de operação da concessionária.

Será apresentada a metodologia para a implementação do sistema e considerado um estudo de caso.

ABSTRACT

In these days, the energy measurement system for residences in urban areas is carried out by eletromechanical meters, which are read manually. Several problems have been observed in this process, which we can emphasize: reading errors, difficulty to access the measurement place, outdated databases, etc. The reading and the measurement automation processes, based in the current eletromechanical meters or with the electronic version of these equipment, besides solving the mentioned problems, have several advantages, such as: minimization of fraud and robbery of energy, implementation of differentiated rates depending on the time of the day (ex:yellow rate), remote energy switch-off and switch-on, implementation of a prepaid system, possibility to get the load curve of each consumer and elimination of error and costs embedded in the manually reading process.

On the other hand, we can observe that in Brazil there are an estimated 43 millions residential meters already installed, and the costs for the current measurement system, and also of the meters, are very low. In this scenario, the implementation of a automated system for residential energy measurement is that the proposed system has a very low cost at the same time provides a high reliability.

The proposed automation system will consider the reutilization of the current mechanical meters, with the installation of an electronic systems for the consumption data collection, communicating with local concentrators, which in their turn are linked to a computing systems in the energy company.

The results of the present work show that, nowadays, there is a real possibility to get, a trustable and cheap automated measurement system for energy in residential urban area.

The proposed work is the development of an automated system, for residential energy measurement in urban area. It's composed of a concentrator module for eight residences, with communication from this point to the energy company's operation center.

It will be presented a methodology to implement such a system and also a case study.

Lista de Figuras

Figura 2.1 – Desagregação da Curva de Carga-Sistema CPFL (Fonte: CPFL)	30
Figura 2.2 – Medidor eletrônico conectado a um leitor de smartcard removível, e o smartcard acima.....	34
Figura 3.1 – Mecanismo de um medidor eletromecânico de indução. (1) - Bobina de tensão. (2) Bobina de corrente. (3) Estator que concentra e confina o campo magnético. (4) - Disco rotor de alumínio. (5) - Ímã de frenagem do rotor. (6) - Engrenagem para transmissão do giro. (7) - Conjunto de ponteiros com os mostradores.	39
Figura 3.2 – (a) Medidores eletrônicos. (b) Medidor estático Ampére Hora. (c) Medidores Microprocessados.	40
Figura 3.3 – Esboço de ligação física no qual cada equipamento antifraude pode atender até oito consumidores.....	44
Figura 3.4 – Disposição interna dos principais componentes de um sistema antifraude que atenda até oito consumidores. Para efeito de visualização a parte de potência foi representada apenas para um dos medidores.	45
Figura 3.5 – Diversos tipos de displays disponíveis no mercado.....	45
Figura 3.6 – Medidor com display para tarifação diferenciada.....	48
Figura 3.7 – Sistema pré-pago.....	49
Figura 4.1 – Modulação FSK	52
Figura 4.2 – Comparação entre protocolos de comunicação wireless.....	55
Figura 4.3 – Arquitetura de Redes Bluetooth.....	57
Figura 4.4 – Equipamento do sistema Carrier do fabricante Asea Brown Boveri	63
Figura 4.5 – Densidade espectral de um sinal em banda base e um sinal “espalhado”.....	67
Figura 5.1 – Arquitetura do sistema antifraude proposto	74
Figura 5.2 – Instalação do módulo concentrador no poste com os displays residenciais.....	75
Figura 5.3 – Diagrama esquemático do módulo concentrador que irá interno à caixa.	75
Figura 5.4 – Sistema Proposto para a Medição de Energia.....	79
Figura 6.1 – Fotos do módulo concentrador.....	87

Figura 6.2 – Fotos do módulo de corte e religamento	87
Figura 6.3 – Fotos do módulo display	89
Figura 6.4 – Idéia de expansão do sistema para futuro	90

Lista de Tabelas

Tabela 2.1- Tipos de fraudes comuns em instalações de energia elétrica e seus respectivos enquadramentos legais.....	26
Tabela 2.2 – Modelos de Tarificação adotados pela ANEEL	29
Tabela 2.3 – Exemplo de custo de energia para a tarifa amarela proposto pela COELCE	31
Tabela 2.4 – Vantagens e desvantagens dos diversos sistemas possíveis de instalação de medidores para implementação da tarifa amarela em consumidores residenciais.	32

Lista de Abreviaturas e Siglas

ABNT	Associação Brasileira de Normas e Técnicas
AC	Corrente Alternada
ADSL	Asymmetrical Digital Subscriber Line
AM	Amplitude Modulada
AMPS	Advanced Mobile Phone Service
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ASCII	American Standard Code for Information Interchange
AT&T	Empresa Americana tradicional que atua em Telefonia
CEBus	Consumer Electronics Bus
CELCA	Co-operative Electrica Limitada de Carmen de Areco
COELCE	Companhia de Energia Elétrica do Ceará
COS	Centro de Operação do Sistema
CP	Código Penal
CPFL	Companhia Paulista de Força e Luz
CPU	Unidade Central de Processamento
Criptografia RSA	RSA corresponde às iniciais dos inventores destes códigos
CSMA	Carrier Sense Multiple Access
CSMA/CDCR	Carrier Sense Multiple Access/Collision Detection and Resolution
CTP	Centralized Token Passing
DCF	Dual Carrier Frequency
DIN	Norma Técnica Alemã
DPL	Digital Power Line
DS/FH	Direct Sequence/ Frequency Hoping
DSMA	Datagram Sensing Multiple Access
DS-SS	Direct Sequence Spread Spectrum
DTMF	Dual Tone Multi Frequency
FDMA	Frequency Division Multiple Access
FH-SS	Frequency Hoping Spread Spectrum
FSK	Frequency Shift Keying
GLD	Gerenciamento pelo Lado da Demanda
GPRS	General Packet Radio Service

GPS	Global Position System
GSM	Global Standard Mobile
HF	High Frequency
iCAL	Intelogis Common Application Language
ID	Idendificador
IEEE.	Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos
IP	Inthernet Protocol
ISM	Industrial Scientific Medical
Kbps	Kilobits por segundo
Kd	Constante do disco do medidor
Kp	Constante de transfomação dos TP's
Lon Work	Local Operating Network
Lon Talk.	Local Operating Talk
Mbps	Megabits por segundo
MEW	Ministry of Energy and Water
Modems	Modulador - Demodulador
NBR	Norma Brasileira
NTT	Nippon Telephone & Telegraph
OFDM	Orthogonal Frequency-Division Multiplexing
P&D	Projeto & Desenvolvimento
PC	Computador Pessoal (Microcomputador)
PLC	Power Line Communication
PLX	Power Line Exchange
PSTN	Public Switched Telephone Network
RF	Rádio Frequência
Smartcard	Cartão inteligente
SMS	Short Message Service
SSC	Spread Spectrum Carrier
STC	Sistemas de Telecomando Centralizado
TCP/IP	Transfer Control Protocol / Inthernet Protocol (usado em WANs)
TDMA	Time Division Multiple Access
VHF	Very Higy Frequency
VPN	Virtual Private Network

Wi Fi

Wireless Fidelity

WLAN

Wireless Local Area Network

WPAN

Wireless Personal Area Network

Sumário

CAPÍTULO 1 – Introdução	19
1.1 Medição Convencional de Energia Elétrica Residencial.....	19
1.2 Automação da Medição e Faturamento de Energia Elétrica	20
1.3 Combate ao Furto de Energia	21
1.4 Uso do Medidor Existente	21
1.5 Sistemas de Comunicação Utilizados.....	22
1.6 Justificativa e Objetivos do Trabalho	23
1.7 Organização do Trabalho.....	24
CAPÍTULO 2 - Vantagens da Automação da Medição de Energia Elétrica	25
2.1 Operação de Combate ao Furto de Energia	25
2.1.1 Posicionamento da ANEEL Quanto ao Problema de Furto de Energia.....	25
2.1.2 Uso da Automação no Combate ao Furto de Energia	27
2.2 Sistema de Tarifas Previsto pela ANEEL.....	28
2.2.1 Tarifa Amarela	29
2.3 Formas de Implementação de um Sistema de Tarifas Diferenciadas em Consumidores Residenciais	31
2.3.1 Implementação da Tarifa Amarela.....	31
2.3.2 Sistema Pré-Pago de Energia Elétrica.....	32
2.4 Gerenciamento pelo Lado da Demanda - GLD	35
2.5 Vantagens Adicionais	37
CAPÍTULO 3 - Sistemas de Automação da Medição da Energia Elétrica	38
3.1 Medidores de Energia Elétrica	38
3.1.1 Medidores Eletromecânicos de Indução	38
3.1.2 Medidores Eletrônicos	39
3.2 Cálculo Numérico da Potência Consumida	40
3.3 Interfaces e Tecnologias Utilizadas no Tratamento dos Sinais dos Medidores	42
3.3.1 Medidores Eletromecânicos com Saída de Pulso.....	42
3.3.2 Medidores Eletrônicos	42

3.3.3 Medidores Eletrônicos Dedicados.....	42
3.4 Tecnologias de Comunicação Consideradas	43
3.5 Sistemas Antifraude nos Processos de Medição.....	43
3.5.1 Circuito de Totalização e Controle.....	46
3.6 Sistema de Tarifação Diferenciada.....	47
3.7 Sistema de Pré-Pago	48
3.8 Sistemas Mistos e Funções de Qualidade de Energia.....	49
CAPÍTULO 4 – Sistemas de Comunicação.....	51
4.1 Sistemas de Comunicação sem Fio	51
4.2 Sistemas de Comunicação via Rádio.....	51
4.2.1. Comunicação Via Rádio Operando em HF.....	51
4.2.2. Comunicação Via Rádio Operando em VHF.....	52
4.2.3. Comunicação Via Rádio FSK	52
4.2.4. Comunicação Via Rádio por Microonda.....	53
4.2.5. Padrão ZigBee	54
4.2.6. Padrão Bluetooth.....	56
4.2.7. Comunicação via Satélite de Órbita Alta	57
4.2.8. Comunicação via Satélite de Órbita Baixa.....	58
4.2.9. Comunicação via Telefonia Celular	59
4.3 Sistemas de Comunicação com Fios ou Fibras Ópticas	60
4.3.1 Modems Convencionais	61
4.3.2 Modem ADSL	62
4.3.3 Modems de Custos Acessíveis	62
4.4 <i>Power Line Communication</i>	62
4.4.1 Sistema Carrier.....	63
4.4.2 Power Frequency.....	64
4.4.3 Protocolo X-10	65
4.4.4 Modulação OFDM	66
4.4.5 Spread Spectrum	66
4.4.6 Protocolo CEBus	68
4.4.7 Comunicação Lon Works.....	68

4.4.8 Comunicação Adaptive Networks.....	68
4.4.9 PLUG-IN	69
4.4.10 Comunicação via GPRS	69
4.4.11 Escolha do meio de Comunicação	70
CAPÍTULO 5 - Metodologia para Implementação do Sistema Proposto	71
5.1 Conceito de Operação do Sistema Antifraude.....	71
5.1.1 Abrangência do Sistema Antifraude	72
5.1.2 Levantamento da Posição do Módulo Concentrador	72
5.2 Arquitetura do Sistema Antifraude.....	73
5.3 Instalação do Sistema Antifraude	74
5.3.1 Instalação Módulo Concentrador	74
5.3.2 Características da Caixa que Abriga o Módulo Concentrador.....	76
5.3.3 Instalação do Display	76
5.4 Procedimentos de Operação e Comunicação.....	77
5.4.1 Tecnologia de Comunicação Utilizada	77
5.4.2 Procedimentos de Comunicação com o Display	77
5.4.3 Procedimentos de Comunicação com Coletor Portátil.....	77
5.4.4 Procedimentos de Comunicação em Rede	78
5.4.5 Ilustração do Sistema Proposto para a Medição de Energia	79
5.4.6 Flexibilidade de expansão do Módulo Concentrador.....	79
CAPÍTULO 6 - Estudo de Caso	80
6.1 O Problema Enfrentado pela Bandeirante Energia.....	80
6.2 Desenvolvimento do Sistema de Antifraude	81
6.2.1 Cronograma para Implementação da Solução.....	82
6.2.2 Resultados das Etapas do Ano I	82
6.2.3 Resultados das Etapas do Ano II.....	83
6.3 A Solução Tecnológica Desenvolvida.....	84
6.3.1 Módulo Concentrador	85
6.3.2 Módulo de Corte/Religamento	87
6.3.3 Fonte de Alimentação	88
6.3.4 Módulo Display	88

6.4 Resultados Obtidos	89
CAPÍTULO 7 - Conclusões e Sugestões	91
7.1 Conclusões.....	91
7.1.1 Conclusões de Ordem Técnica.....	91
7.1.2 Conclusões de Ordem Econômica	92
7.2 Sugestões para Trabalhos Futuros	94
REFERÊNCIAS	96

CAPÍTULO 1 – Introdução

O conceito atual de automação refere-se a um sistema pelo qual os mecanismos controlam seu próprio funcionamento, quase sem a interferência do homem [1]. Esse assunto é objeto de estudo de diversas aplicações atuais, e uma das áreas de estudo desse conceito, que é assunto principal deste trabalho, é a automação da medição de energia elétrica com foco em consumidores residenciais. Neste caso os objetivos principais são a redução de custos tanto na instalação quanto na operação do sistema e o uso amplo pelas concessionárias de energia elétrica.

Atualmente os consumidores de energia elétrica residencial praticamente não estão sendo atendidos por sistemas de automação, mas existem casos onde esse tipo de automação se torna vantajosa, tanto pelo aspecto da qualidade de serviços quanto pela redução de perdas comerciais, além da disponibilidade de tarifas diferenciadas para o consumidor.

Na área industrial estão os consumidores melhor atendidos, tanto em termos de diversidade de planos e tarifas, quanto pela efetiva implantação de sistemas de automação da medição de energia elétrica. Esse cenário se deve ao fato de que os valores de energia pagos pelos consumidores industriais justificam facilmente os investimentos em automação, o que não é o caso dos consumidores residenciais, onde o processo de implantação de sistemas de automação da medição de energia elétrica é muito mais complexo.

O enfoque principal deste trabalho será a automação da medição residencial aplicada em grandes centros urbanos, no entanto, é importante citar que a maior parte do que será descrito também pode ser aplicado na automação da medição de energia elétrica em consumidores industriais.

1.1 Medição Convencional de Energia Elétrica Residencial

A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) estima que atualmente no Brasil o número total de unidades consumidoras residenciais de baixa tensão esteja situado em torno de 43 milhões [2], sendo praticamente todas constituídas por medidores eletromecânicos. Uma entrada padrão de energia que atende às normas das concessionárias custa em torno de R\$ 100,00 [3], valor geralmente cobrado do consumidor, que se torna o dono do medidor instalado em sua residência. A leitura desses medidores é realizada de forma manual, normalmente com uma periodicidade mensal. O medidor eletromecânico monofásico recebe

os sinais de tensão e corrente do poste e os transfere para a residência, monitorando assim a energia consumida. Seu funcionamento se baseia em um disco giratório cuja velocidade angular é proporcional à energia consumida. Um sistema mecânico de contagem totaliza o número de voltas do disco e informa a energia ativa [4].

1.2 Automação da Medição e Faturamento de Energia Elétrica

Em centros mais desenvolvidos, a medição e o faturamento de energia elétrica de consumidores residenciais, comerciais e industriais são efetuadas através de dispositivos eletrônicos e sistemas de comunicação que permitam a totalização automática do valor mensal de energia e a informação diretamente ao sistema de faturamento da concessionária, sem qualquer intervenção manual [5].

Um sistema de medição e faturamento automatizado, além de dispensar os processos de leitura manuais, evitando que erros sejam cometidos, possui outras vantagens, permitindo também as seguintes operações:

- Implementação de programa de energia pré-paga [6];
- Faturamento horo-sazonal (tarifa amarela) [7];
- Corte e religamento remotos de energia [8];
- Levantamento da curva de carga do consumidor;
- Melhor acompanhamento por parte do consumidor, com totalização parcial de energia consumida e estimativa de consumo mensal em kWh e em moeda corrente;
- Maior combate a fraudes e ao furto de energia [9].

Algumas das vantagens do uso de sistemas de automação da medição de energia, como o sistema pré-pago e a tarifa amarela, por exemplo, podem ser obtidas com o uso de medidores eletrônicos, mesmo que estes não se comuniquem com um sistema central.

Apesar dos sistemas de automação da medição de energia elétrica trazer benefícios, tanto para os consumidores quanto para a concessionária, o número de consumidores atendidos por medidores eletrônicos ou sistemas automatizados de medição e faturamento ainda é desprezível se comparado ao número total de consumidores residenciais no país. Este cenário de baixa automação se deve basicamente aos seguintes fatores:

- O custo da leitura manual é relativamente baixo, sendo estimado em R\$ 0,50 por ponto de medição [10], totalizando um gasto de R\$ 60,00 em um período de dez anos,

o que restringe o valor do investimento em automação se for considerada somente a eliminação da leitura manual.

- Na maior parte das residências o consumo é inferior a 200 kWh por mês [11] e desta forma, a receita obtida a partir da venda de energia para estes consumidores é relativamente baixa, o que restringe os investimentos em automação.

1.3 Combate ao Furto de Energia

Observando o aspecto de combate à fraude e ao furto de energia, é possível caracterizar dois tipos de sistema de automação:

- **Sistemas tradicionais:** São sistemas de automação instalados sem grandes preocupações com o problema de fraudes ou furto de energia, que ficam mais acessíveis aos consumidores, da mesma forma que os medidores tradicionais.
- **Sistemas antifraude:** São sistemas de automação nos quais o medidor é tirado de dentro da residência e colocado próximo ao ponto de tomada de energia [12]. Neste caso o sistema deve ser instalado em lugar de difícil acesso (normalmente no próprio poste), mas ao mesmo tempo deve possibilitar que o consumidor tenha acesso ao valor medido, o que demanda o uso de um “display” ou visualizador que fique em um local de fácil acesso.

1.4 Uso do Medidor Existente

Como os medidores eletromecânicos são de custos reduzidos, os sistemas de automação podem ser desenvolvidos com base nos medidores já existentes no sistema [13]. Considerando este fator, têm-se basicamente cinco opções de automação:

- **Medidores eletromecânicos com saída de sinal (pulso)** – A estrutura destes medidores não difere dos convencionais, vindo de fábrica com sensores ópticos que irão monitorar a revolução do disco, gerando um pulso de totalização de energia a cada volta do mesmo. Neste caso a automação é efetuada por meio de um circuito eletrônico que tem somente a função de totalizar os pulsos e transmitir os valores de energia assim obtidos para uma central ou um equipamento de coleta de dados. Por ser simples, este circuito tem custo reduzido.
- **Medidores eletromecânicos convencionais** – Como a cada novo sistema de automação instalado tem-se um medidor convencional sendo substituído, estes

medidores podem ser adaptados, com a instalação de sensores para geração de pulsos, de forma a simular os medidores com saída de sinal.

- **Medidores eletrônicos** – Esses medidores [14] possuem uma série de facilidades de comunicação e poderiam ser diretamente utilizados na construção de um sistema de automação. O ponto mais crítico seria o custo relativamente elevado deste tipo de medidor, que muitas vezes possui facilidades adicionais que não são totalmente utilizadas.
- **Medidores mistos** – São medidores de custo reduzido nos quais um circuito eletrônico é utilizado para geração de pulsos de energia, acionando um contador mecânico que faz a totalização [15]. Estes medidores têm custo equivalente ao do medidor eletromecânico convencional, mas são muito mais robustos e compactos. Neste caso, a saída de pulsos disponível é lida por um circuito eletrônico externo que se comunicaria com uma central ou mesmo com um equipamento de coleta de dados.
- **Medidores dedicados** – O projeto e fabricação de um medidor dedicado é uma hipótese que deve ser avaliada, principalmente se forem necessárias características específicas. Devido ao grande número de medidores que um sistema efetivo de automação da medição demanda, os custos de projeto podem ser facilmente diluídos se o medidor a ser produzido se tornar de custo reduzido, devido à customização de algumas características.

1.5 Sistemas de Comunicação Utilizados

Considerando os aspectos do sistema de comunicação a ser utilizado na automação da medição de energia elétrica, podem ser adotados os seguintes sistemas:

- **Sem comunicação** – No caso da implementação de sistema pré-pago de energia [16], a comunicação pode ser totalmente dispensada, pois a tarifação é realizada por meio de cartões (normalmente smart card's [17]) lidos diretamente pelo medidor.
- **Leitura semi-automática** – Em alguns tipos de sistemas de automação (por exemplo, em sistemas antifraude), a leitura do consumidor pode ser feita de uma forma semi-automática, na qual um leiturista utiliza uma unidade portátil (normalmente um coletor de dados [18] ou um palmtop [19]) para receber diretamente o valor medido. Neste caso a comunicação é feita sem contato elétrico, geralmente por meio de sinais infravermelhos.

- **Uso de canal de comunicação do consumidor** – Nestes sistemas a comunicação é feita através da própria linha telefônica do consumidor que é aproveitada em momentos de baixo uso e sem custo de ligação (ou custo desprezível). Este sistema tem maior aplicação nos casos onde a automação é necessária devido a problemas de acesso ao medidor ou casos onde o consumidor não deseja a presença do leiturista, estando assim mais receptivo ao compartilhamento de sua linha telefônica.
- **Comunicação dedicada** – Devido ao alto custo dos canais de comunicação, este tipo de solução passa pela criação de uma rede local de custo reduzido [20] que integre uma série de medidores a um equipamento concentrador que, por sua vez, já pode ter uma ligação dedicada com uma central ou mesmo estar conectado a uma outra rede dedicada que transfira os dados para um próximo nível (um concentrador maior) que estará por fim ligado a uma central. As redes locais de custo reduzido podem ser obtidas basicamente por meio de tecnologia de comunicação sem fio [21] (via rádiofrequência) ou que utilizem a própria rede elétrica como meio físico de transmissão [22] (Power Line Communication).

Se forem observados em conjunto, os aspectos descritos acima definem uma série ampla de cenários, o que mostra que o problema da automação da medição de energia elétrica é em suas bases bastante complexo devido à variedade de sistemas e situações que podem ser observados na prática. Desta forma, para lidar com o problema da automação da medição de energia elétrica, serão observadas as tecnologias de processamento digital utilizadas nos circuitos de automação e também as tecnologias de comunicação disponíveis, buscando sempre uma ligação com sistemas reais de automação que estão sendo implantados pelas concessionárias.

1.6 Justificativa e Objetivos do Trabalho

Conforme descrito anteriormente, apesar da automação da medição de energia elétrica em consumidores residenciais apresentar diversas vantagens, o principal fator restritivo desta automação tem caráter econômico. Observa-se a utilização dessa automação somente para resolver problemas específicos [23], como por exemplo, leitura automatizada em locais de difícil acesso ou em consumidores que não desejam a presença de leituristas (como é o caso de muitos condomínios fechados).

Por outro lado, o constante avanço da eletrônica digital e da computação, juntamente com a disseminação dos sistemas de comunicação digital vêm criando um cenário novo, no

qual não somente os custos dos equipamentos estão reduzindo, assim como os custos de operação dos canais de comunicação estão sendo minimizados. Este cenário está permitindo que os sistemas de automação da medição de energia se tornem de custo mais reduzido com menores custos de operação, o que certamente vai contribuir para a sua maior aplicação, tanto na automação da medição de energia na área industrial, como também na medição residencial e comercial.

O presente trabalho tem por objetivo dar uma contribuição para a disseminação de sistemas de automação da medição, através do estudo de casos mais críticos, onde esta automação se faz necessária, avaliando as tecnologias de processamento digital e de sistemas de comunicação que podem ser utilizados em sistemas de automação da medição e observando alguns aspectos técnicos e econômicos relativos a esta utilização.

1.7 Organização do Trabalho

Esta dissertação está organizada em sete capítulos. No primeiro capítulo será apresentada uma introdução à automação da medição de energia elétrica e seus objetivos.

No segundo capítulo serão apresentadas as vantagens dos sistemas de automação da medição de energia elétrica, considerando principalmente os aspectos de combate ao furto de energia, sistemas pré-pagos, faturamento horo-sazonal e gerenciamento do consumo.

O terceiro capítulo enfoca as características, formas de operação e especificações técnicas dos sistemas atuais de automação de medição de energia elétrica.

No quarto capítulo será apresentada a evolução do sistema de comunicação e o estado em que se encontra.

O quinto capítulo apresenta um sistema de automação da medição de energia elétrica residencial para minimização de perdas comerciais sugeridos às concessionárias.

No sexto capítulo será apresentado um estudo de caso referente à concessionária Bandeirante Energia.

No sétimo capítulo são apresentadas as conclusões deste trabalho e sugestões para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2 - Vantagens da Automação da Medição de Energia Elétrica

Neste capítulo serão apresentadas as vantagens advindas da automação da medição da energia elétrica residencial. Observa-se que os sistemas apresentados podem ser aplicados também em consumidores comerciais e até mesmos consumidores industriais de pequeno porte. O enfoque dado aos consumidores residenciais representa apenas o caso mais crítico, constituído por um grande número de pontos a serem monitorados, no entanto, o valor de energia consumido em cada um deles é relativamente baixo, de forma que os recursos disponíveis para a automação também são pequenos.

O cenário para grandes consumidores comerciais e indústrias é bastante distinto, nestes casos os valores de energia consumida justificam plenamente os processos de automação, tanto que atualmente este é um dos setores que mais se encontra automatizado, com grande aplicação de medidores eletrônicos e também formas de tarifação diferenciadas.

2.1 Operação de Combate ao Furto de Energia

As concessionárias de energia elétrica nacionais desenvolvem hoje uma grande operação de combate ao furto de energia elétrica [24]. A prática de desviar energia clandestinamente, conhecida como “gato”, é considerada como furto de energia, tipificada como crime inafiançável, com pena prevista de um a quatro anos de prisão. O problema afeta a empresa fornecedora, o cidadão que paga suas contas e o Estado, que deixa de arrecadar impostos sobre a energia faturada. Observa-se que em determinadas regiões o índice de perdas chega a atingir 25%, fazendo com que algumas concessionárias tenham prejuízo de até R\$ 500 milhões por ano. Desta forma, um sistema sugerido, que venha a minimizar essas perdas comerciais, será bem aceito pelas concessionárias distribuidoras de energia.

2.1.1 Posicionamento da ANEEL Quanto ao Problema de Furto de Energia

Conforme menciona *Agência Brasil* [25], normalmente esse tipo de delito é detectado pelo próprio sistema de controle de consumo da empresa fornecedora e também por meio de denúncias. A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) quer rever a regulamentação contra furto de energia elétrica para desestimular esse tipo de fraude e para evitar que a Agência seja inundada com apelações de consumidores punidos. Um dos objetivos da ANEEL é garantir que haja punição efetiva para quem fizer o "gato". O Código Civil permite

que as empresas cobrem retroativamente até cinco anos de contas atrasadas [26], mas muitas vezes as agências reguladoras estaduais, que fazem a fiscalização mediante convênio com a ANEEL, acabam reduzindo muito o período da cobrança, diminuindo o efeito da punição. Na opinião da diretoria da ANEEL, a retroatividade não pode ser muito longa, para forçar as distribuidoras a fazerem fiscalizações com maior regularidade e eficácia. Além disso, a ANEEL pretende padronizar as punições aos autores de furto de energia. Hoje a distribuidora pode cobrar o valor da energia consumida e não paga acrescida de 30%, referente a custos administrativos. No caso de suspeita de furto, alude o artigo 72, inciso II, da Resolução ANEEL n.º 456/2000, a realização de perícia técnica por órgão vinculado à Secretaria de Segurança Pública [27] ou por entidade metrológica oficial. Se for constatado que realmente houve o furto da energia elétrica pelo usuário do serviço, incumbe à prestadora dar notícia-crime à autoridade policial, a fim de que seja realizada a perícia oficial a que alude o artigo 72, inciso II, da Resolução ANEEL n. 456/2000. O consumidor deve entender que, com a redução de fraudes, ele será beneficiado com uma melhor qualidade de serviços, redução do número de interrupções de energia provocada pelo manuseio da rede elétrica por pessoas não qualificadas e, principalmente, o trabalho de reeducação no sentido de conscientizar a população de que o ato de fraudar a leitura constitui um crime passível de ação penal. A tabela 2.1 mostra alguns casos práticos de furto de energia e seu respectivo enquadramento legal [28]:

Tabela 2.1- Tipos de fraudes comuns em instalações de energia elétrica e seus respectivos enquadramentos legais.

Tipo de Fraude	Enquadramento Legal
Alteração do fundo de escala interno do circuito eletrônico do medidor, fazendo com que o mesmo registre valores inferiores ao consumido.	Art. 155, § 4º, inciso I do C.P. - Furto Qualificado.
Manipulação dos ponteiros do medidor, fazendo com que o mesmo registre valores inferiores ao consumido.	Art. 171 – Estelionato
Desvio da corrente em uma ou duas das fases, fazendo com que a corrente dessas fases não passe pelo medidor.	Art. 155, § 4º, inciso II do C.P.
Fraude na transferência de titularidade.	Art. 171 - Estelionato do C.P., sendo que em

	alguns casos incide ainda a falsidade ideológica e documental.
Falsificação do código de barras da conta.	Art. 171 - Estelionato do C.P.
Ligação direta, antes do medidor.	Art. 155, § 3º do C.P. - Furto Simples.
Violação do lacre do medidor e da caixa protetora.	Art. 630 (Código Civil) - “Se o depósito se entregou fechado, colado, selado, ou lacrado, nesse mesmo estado se manterá.”.
Alteração mecânica no tamanho das engrenagens do medidor, provocando a redução do registro visualizada através dos ponteiros.	Art. 155, § 4º, inciso I do C.P. - Furto Qualificado.
Alteração do registro do medidor, provocada por ímã ou qualquer dispositivo que, por indução magnética, dificulte o giro dos ponteiros.	Art. 155, § 4º, inciso I do C.P. - Furto Qualificado.

2.1.2 Uso da Automação no Combate ao Furto de Energia

Conforme descrito anteriormente, a maior parte das fraudes, do furto e do roubo de energia elétrica são cometidas nas proximidades do medidor, seja atuando sobre o mesmo ou ainda “contornando” o medidor (*bypass*) e captando energia diretamente da entrada antes da medição. Desta forma, uma medida que tem grande eficácia contra o roubo de energia consiste em colocar o medidor em um local de difícil acesso, como por exemplo, uma caixa blindada instalada no próprio poste, próxima à tomada de energia. Com tal instalação, tanto a adulteração do medidor quanto o *bypass* ficam dificultados. Neste tipo de instalação a principal vulnerabilidade continuaria a ser o desvio direto (“gato”), que pode ser facilmente identificado por meio de uma simples inspeção visual do alimentador de baixa tensão. Entretanto a solução de “isolar” o medidor não pode ser diretamente aplicada, pois tanto o leiturista quanto os consumidores não teriam acesso ao valor indicado pelo mesmo. Com essas situações, a solução utilizando um sistema de automação da medição pode assumir diferentes graus de sofisticação. Algumas soluções clássicas são apresentadas a seguir:

- **Display** – O sistema mais simples que pode ser implementado consiste apenas em um *display* que fica instalado em um local de fácil acesso e recebe a informação do valor de energia indicado no medidor por meio de um sistema de comunicação dedicado.

Neste caso, tanto o leiturista quanto o consumidor têm acesso ao consumo de energia por meio deste *display*. Como o acesso ao circuito de entrada fica mais complicado, em casos onde seja necessário realizar um corte de energia por problemas de inadimplência, uma chave geral poderia ser instalada na caixa que contém o medidor (cuja tampa pode ficar trancada) de forma a facilitar o processo de corte e religamento.

- **Display e Comunicação com Infravermelho** – Um sistema um pouco mais sofisticado pode prever, além do *display*, um canal de comunicação infravermelho, de forma que o leiturista possa obter o valor de energia medido através de um coletor de dados portátil, apontando-o para a caixa onde se encontra o medidor. Este sistema, além de eliminar os erros de leitura, também agiliza a mesma, pois o leiturista não precisará entrar nas residências, somente percorrer o ramal de distribuição. Neste caso, pode-se utilizar um circuito automático de corte e religamento que por sua vez seria comandado pelo próprio coletor de dados, com o uso de códigos criptografados, evitando o uso indevido desta função.
- **Display com Comunicação Central** – Neste tipo de sistema, além do *display*, existe um canal de comunicação dedicado que permite a conexão do medidor diretamente com uma central da concessionária. Desta forma, além de fazer a leitura automática do consumo, a concessionária também pode monitorar tentativas de fraude (com uso de sensores digitais na tampa da caixa). Opcionalmente podem ser instalados circuitos para corte e religamento comandados remotamente a partir da própria central da concessionária.

2.2 Sistema de Tarifas Previsto pela ANEEL

A ANEEL prevê dois sistemas básicos de faturamento de energia elétrica [29]:

- **Estrutura Tarifária Convencional:** Caracterizada pela aplicação de tarifas de consumo de energia elétrica e/ou demanda de potência independentemente das horas de utilização do dia e dos períodos do ano.
- **Estrutura Tarifária Horo-Sazonal:** Caracterizada pela aplicação de tarifas diferenciadas de consumo de energia elétrica e demanda de potência de acordo com as horas de utilização do dia e os períodos do ano.

A estrutura horo-sazonal pode ser aplicada segundo alguns modelos de tarifação, apresentados na tabela 2.2:

Tabela 2.2 – Modelos de Tarifação adotados pela ANEEL

Modelo	Modo de Tarifação
Tarifa Azul:	Estruturada para aplicação de tarifas diferenciadas de consumo de energia elétrica de acordo com as horas de utilização do dia e os períodos do ano, bem como tarifas diferenciadas de demanda de potência de acordo com as horas de utilização do dia.
Tarifa Verde:	Estruturada para aplicação de tarifas diferenciadas de consumo de energia elétrica de acordo com as horas de utilização do dia e os períodos do ano, bem como de uma única tarifa de demanda de potência.
Tarifa Amarela:	Estruturada para aplicação de tarifas diferenciadas de consumo de energia levando em consideração a hora do dia em que esta energia é consumida. No horário de maior carregamento (horário de ponta que geralmente vai de 17h30min às 20h30min), a energia elétrica terá tarifas mais elevadas. Fora do horário de ponta, a tarifa será de menor custo.

2.2.1 Tarifa Amarela

O setor elétrico sempre dimensiona a capacidade dos sistemas de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica em função da demanda máxima, ou seja, através do consumo máximo das cargas conectadas ao sistema, que ocorre no chamado “horário de pico” ou “horário de ponta”.

Se fosse possível distribuir melhor o consumo de energia ao longo do dia, aliviando o intervalo de pico, mais consumidores poderiam ser atendidos sem que fosse necessário expandir o sistema elétrico. Se for considerado que o consumo cresce a cada ano e que nossos sistemas elétricos já se encontram sobrecarregados, este se torna um ponto muito importante, pois ao invés de realizar pesados investimentos na ampliação da capacidade de carga do sistema, as concessionárias têm também a opção de investir em estratégias que reduzam o consumo durante o horário de pico.

A figura 2.1 mostra uma curva de carga da CPFL na qual a contribuição dos diversos tipos de consumidores é apresentada. Nesta figura vê-se claramente que os principais responsáveis pelo aumento da carga nos horários de pico são os consumidores residenciais que é exatamente a classe que atualmente não está sendo contemplada com um sistema de tarifação diferenciada.

Nas residências, um dos equipamentos elétricos que mais influencia no consumo são os chuveiros elétricos e os sistemas que geram calor a partir da energia elétrica (torneiras

elétricas, ferros, secadores de cabelo e secadoras de roupa). Um hábito muito comum do consumidor brasileiro é utilizar o chuveiro por um longo período, logo ao chegar em casa após um dia de trabalho, fato que ocorre geralmente no horário de pico. Como um único chuveiro chega a representar 70% da demanda máxima de uma residência, se fosse evitado seu uso no horário de pico em uma boa parcela dos consumidores residenciais, certamente haveria uma grande redução da carga conectada ao sistema nestes horários. A tarifa amarela prevê um aumento na cobrança da energia elétrica nos horários de pico, exatamente com o objetivo de se reduzir o consumo nesses horários e melhorar a distribuição do consumo durante o dia.

Figura 2.1 – Desagregação da Curva de Carga-Sistema CPFL (Fonte: CPFL)

A tarifa amarela é direcionada basicamente a consumidores residenciais e comerciais. A tabela 2.2 mostra um exemplo de custos de energia para o sistema convencional e para a tarifa amarela proposta pela COELCE [30]. Nesta tabela é possível observar uma redução de praticamente 30% no valor da conta de luz total se o consumidor deixar de consumir nos horários de pico.

Um avanço adicional à tarifa amarela seria uma redução ainda maior no custo da energia nas horas de demanda mínima no sistema de forma a incentivar o uso de equipamentos como secadoras de roupa e bombas d'água (entre outros) nestes horários.

Tabela 2.3 – Exemplo de custo de energia para a tarifa amarela proposto pela COELCE

Tarifa Convencional	Tarifa Amarela	
	Ponta	Fora de Ponta
0,29655 kWh	0,59309 kWh	0,21599 kWh
100%	220%	72%

2.3 Formas de Implementação de um Sistema de Tarifas Diferenciadas em Consumidores Residenciais

2.3.1 Implementação da Tarifa Amarela

A implementação do sistema de tarifa amarela é relativamente simples, bastando que o medidor, ao invés de acumular um único valor total de energia consumida, passe a acumular dois valores: o total de energia consumida fora do horário de ponta e o total de energia consumida dentro do horário de ponta. Este tipo de registro necessita da sincronização de um relógio e demanda o uso de algum tipo de processamento eletrônico. Uma opção bastante simples é o uso de um processador dotado de um relógio interno conectado a um medidor com saída de pulso (ou a um medidor convencional com tal saída adaptada) e que informe os dois totais de energia e também a hora do relógio interno. Como um relógio digital de custo reduzido apresenta uma grande variação para grandes intervalos de tempo (tipicamente na faixa de 10 a 30 segundos por ano), este sistema demanda que o relógio do medidor seja periodicamente ajustado, admitindo erros máximos na faixa de até 1 minuto (adotado como tolerância). A tabela 2.4 mostra as vantagens e desvantagens dos diversos sistemas possíveis de instalação de medidores para a implementação da tarifa amarela em consumidores residenciais.

Tabela 2.4 – Vantagens e desvantagens dos diversos sistemas possíveis de instalação de medidores para implementação da tarifa amarela em consumidores residenciais.

Tipo de Sistema	Vantagens e Desvantagens
Sem comunicação	Problemas de erros de leitura e possibilidade de fraudes no ajuste do relógio do equipamento.
Comunicação com coletor de dados	Neste caso o próprio coletor de dados pode receber as informações de medição e ajustar o relógio interno do medidor. Este tipo de sistema praticamente elimina os erros de leitura e as possibilidades de fraude no horário. O custo adicional é pequeno em relação ao sistema sem comunicação.
Comunicação com uma central	Neste caso a central faz a leitura dos valores de energia consumida e também pode ajustar o relógio interno do medidor periodicamente. A detecção de falhas também pode ser monitorada permitindo maior controle e melhorias no funcionamento e manutenção do sistema.

2.3.2 Sistema Pré-Pago de Energia Elétrica

2.3.2.1 Histórico dos Sistemas Pré-Pagos

Os sistemas pré-pagos, também conhecidos como sistemas pré-vendas [31], que vêm se tornando cada vez mais comuns no caso da telefonia celular, agora estão sendo também aplicados no mercado de energia elétrica.

No caso da energia elétrica um sistema semelhante foi testado recentemente na cidade de Phoenix, Arizona - EUA, o qual recebeu um índice de aprovação de 92 % por parte dos usuários [32].

Em Buenos Aires, Argentina, em maio de 1996, iniciaram-se as implementações de um sistema de pré-pagamento de energia pela CELCA (Co-operative Electrica Limitada de Carmen de Areco). A principal razão que levou a companhia energética a adotar o sistema foi a alta taxa de inadimplência e também de atrasos nos pagamentos. A resposta foi positiva: surpreendentemente, mesmo os mau pagadores adaptaram-se bem ao novo sistema e tornaram-se excelentes clientes para a CELCA [33].

No Kuwait, o Ministério de Eletricidade e Água (MEW) colocou em teste três diferentes sistemas de pré-pagamento [34], utilizando diversos tipos de consumidores: fazendas, lojas, complexos comerciais e edifícios residenciais. Aproximadamente 350 medidores foram instalados desde setembro de 1999 até abril de 2000. O resultado do teste foi

tão bom que o MEW está agora planejando implementar um sistema de pré-pagamento em larga escala no Kuwait.

No Brasil, foram instaladas em Curitiba, Paraná, algumas unidades do medidor desenvolvido, que estão em funcionamento desde agosto de 2000 [35]. Foi obtida total satisfação dos consumidores, que descreveram como positiva a experiência, principalmente por permitir um melhor controle dos gastos com energia elétrica.

2.3.2.2 Funcionamento dos Sistemas Pré-Pagos

Em um sistema pré-pago de energia, existe um medidor eletrônico que opera baseado em “créditos” de energia. Além disso, o medidor deve possuir internamente um mecanismo que possibilite o corte e o religamento automático da energia fornecida, o que normalmente é feito através de relés de estado sólido, pois a corrente a ser comutada é relativamente alta. Neste tipo de sistema o medidor é “carregado” em um dado momento com certo número de créditos (indicados em kWh) e começa a subtrair desses créditos na medida em que a energia vai sendo consumida. Existem diversas formas de fazer a “carga” dos créditos no medidor, mas as mesmas podem ser implementadas de três formas básicas:

- **Medidor com comunicação** - Neste caso o medidor poderá conectar-se a uma central por meio de um sistema de comunicação (que pode ser o próprio telefone do usuário). O medidor tanto poderá ser carregado por meio de um comando da central, como receber uma senha do usuário que será validada junto à central (de forma semelhante ao sistema de recarga de telefones celulares pré-pagos). Neste caso o usuário poderia comprar um cartão de energia vendido em pontos de venda (mercados, farmácias, bancos, caixas eletrônicos) ou ainda comprar através da Internet, por meio de bancos ou no site da própria concessionária. Um custo adicional no medidor relativo ao modem deve ser considerado nesse tipo de sistema. Em sistemas com comunicação as fraudes podem ser evitadas, pois o próprio medidor pode ser utilizado para detectá-las e informar a central.
- **Medidor com cartão** – Essa solução, considerada mais segura, consiste no uso de *smartcards* para o processo de recarga. Um *smartcard* [17] é um cartão semelhante a um cartão de banco, porém com um microchip em seu interior, que lhe confere versatilidade e segurança praticamente absolutas. O *smartcard* é fornecido junto com o medidor e contém a identificação do mesmo gravada em seu interior (figura 2.2). De posse do cartão, o usuário poderá adquirir créditos em qualquer ponto de venda de energia, armazenando-os no cartão e transferindo-os a seguir para o medidor. O custo

adicional de um leitor de *smartcard* e do próprio cartão devem ser considerados. Neste sistema o controle de fraude torna-se difícil, pois não existe qualquer controle direto sobre a operação do medidor, que, por exemplo, em uma condição de corte pode ser burlado por um *bypass*.

- **Medidor com comunicação e com cartão** – Nessa modalidade o usuário entra com um código via teclado no qual estão codificadas as informações do número do medidor e do valor de créditos adquiridos. Para funcionar corretamente, é necessário um sistema de codificação bastante seguro que garanta que o código só possa ser gerado dentro da concessionária. Isso pode ser feito, por exemplo, com base em sistemas de criptografia RSA nos quais estão baseados os sistemas de chave pública/chave privada de sistemas bancários, utilizando uma única chave privada dentro de um equipamento de geração de senhas inviolável instalado dentro da concessionária e uma chave pública em cada medidor. Este sistema ainda é considerado o mais frágil de todos, pois não existe qualquer controle direto periódico sobre a operação do medidor.

No sistema pré-pago de energia, o corte automático em caso de finalização dos créditos só é realizado em dias úteis e durante o horário comercial, evitando que o consumidor fique sem energia à noite ou nos finais de semana, quando é normalmente mais difícil adquirir novos créditos. No entanto, a energia que for consumida a mais gera um crédito negativo que será automaticamente coberto na próxima recarga. Antes deste tipo de corte ocorrer, vários níveis de alarme são emitidos para avisar a quantidade de créditos restantes.

Figura 2.2 – Medidor eletrônico conectado a um leitor de smartcard removível, e o smartcard acima.

Para os sistemas que operam com *smartcard*, no caso de perda do cartão, uma nova unidade poderá ser emitida junto à concessionária, no qual será gravado novamente o número do medidor e também os créditos da última compra, sem comprometer a segurança da venda nem prejudicar o consumidor.

2.3.2.3 Vantagens dos Sistemas Pré-Pagos

As principais vantagens do sistema de pré-pagamento de energia com *smartcard* são:

- Elimina a necessidade de leitura local, que pode ter custo elevado, particularmente no caso de consumidores em lugares remotos;
- Possibilita o fim da fatura entregue na residência, reduzindo os custos operacionais envolvidos na tarifação convencional;
- Dispensa o envio de um eletricista para corte ou religamento de energia;
- Permite um melhor conhecimento e gerenciamento do uso de energia elétrica, facilitando o entendimento de quanto consome cada equipamento ligado à rede elétrica, racionalizando o uso e reduzindo desperdícios;
- Num programa de racionamento de energia, permite vender uma cota limitada de créditos para cada cliente, permitindo também a bonificação de clientes especiais;
- Em prédios novos, os medidores podem ser instalados em áreas distribuídas em cada andar do edifício, possibilitando o uso de um barramento único de distribuição de energia, reduzindo o custo da construção;
- Garante privacidade/segurança dos consumidores, pois não necessita que um leiturista entre nas residências todo mês para fazer a coleta de informações;
- Permite melhor controle sobre as contas de energia para locadoras prediais, no caso de inadimplência ou desocupação dos imóveis.

Com o sistema de pré-pagamento de energia elétrica, uma série de alternativas se abrem para as concessionárias e usuários, permitindo um melhor controle sobre a venda e uso da energia elétrica, além da redução de custos na instalação das linhas de distribuição em edifícios.

2.4 Gerenciamento pelo Lado da Demanda - GLD

Um conceito novo que vem sendo discutido pelas concessionárias em todo o país é o Gerenciamento pelo Lado da Demanda [36] (GLD). O GLD representa princípios empresariais de maximização de lucros, na medida em que o gerenciamento da demanda se

constitui alternativa economicamente mais atraente do que os investimentos em obras para aumentar a geração de energia, já que ele otimiza o uso dos recursos disponíveis .

Na realidade o GLD é algo que fica além da simples automação da medição e do faturamento, sendo uma estratégia muito mais ampla adotada pela concessionária, que inclui, por exemplo, o controle da iluminação pública, o comando de bancos de capacitores, a limitação e até mesmo o corte de cargas.

Estima-se que, com a aplicação plena do GLD, o potencial de redução da ponta nas regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste, é da ordem de 2.000 MW o que, se fosse obtido pela expansão do sistema, representaria um custo total da ordem de R\$ 250 milhões.

Existem diversas ferramentas para auxiliar um projeto de GLD, principalmente o uso de controladores de demanda de energia para gerenciamento de cargas, e também o uso de medidores que permitam adoção de tarifas diferenciadas para o consumidor residencial (como a Tarifa Amarela, por exemplo). Desta forma a automação da medição é apenas um dos pontos de ação de uma filosofia GLD.

Normalmente o sistema GLD irá compartilhar os mesmos canais de comunicação já disponíveis para os Sistemas de Telecomando Centralizado (STC) [37], que são utilizados para comando de chaves, compensadores e bancos de capacitores ao longo do ramal de distribuição. Desta forma um sistema STC / GLD irá realizar as seguintes funções [38]:

- Gerenciamento de cargas (limitação de cargas em consumidores residenciais);
- Chaveamento de bancos de capacitores à distância;
- Gerenciamento de iluminação pública;
- Gerenciamento de medidores de múltiplas tarifas (tarifação amarela);
- Telecorte (desligamentos e religamentos de inadimplentes à distância).

O uso de controladores de demanda é uma estratégia mais simples, que na prática realiza o desligamento automático da carga total ou de parte dela se uma demanda máxima for excedida. Desta forma pode-se impor um limite ao valor máximo da demanda independentemente do horário de utilização da mesma. Esta poderia ser uma solução de custo acessível especialmente para as faixas de consumidores com menor consumo (abaixo de 200 kWh/mês) e, portanto, menor retorno para um investimento em automação da medição. O consumidor que aceitar este tipo de controle terá uma tarifa mais acessível, mas deverá ter o cuidado de limitar sua demanda máxima sob pena de ter uma parte da carga (por exemplo, circuito de chuveiro) automaticamente cortada.

Já a tarifa amarela seria aplicada a consumidores com consumo médio mensal acima de 250 kWh, caso em que os valores de energia consumida são maiores e justificam os custos adicionais com a automação dos medidores.

2.5 Vantagens Adicionais

Além das vantagens de um sistema de automação da medição de energia residencial relacionadas ao combate a fraudes, diminuição da demanda no horário de pico e ao sistema pré-pago, citadas anteriormente, existem alguns aspectos que são básicos na automação como, por exemplo:

- Eliminação de erros de leitura;
- Possibilidade de leitura em locais de difícil acesso;
- Melhor acompanhamento do consumo mensal por parte do consumidor.

Além disso, sistemas mais elaborados podem coletar dados adicionais como, por exemplo, curvas de carga típicas de grupos de consumidores e também dados sobre o fator de potência das cargas e parâmetros de qualidade da energia fornecida.

CAPÍTULO 3 - Sistemas de Automação da Medição da Energia Elétrica

Neste capítulo os componentes utilizados em sistemas de automação da medição da energia elétrica residencial serão abordados com ênfase nos aspectos técnicos, requisitos operacionais e tecnologias requeridas para cada um.

3.1 Medidores de Energia Elétrica

3.1.1 Medidores Eletromecânicos de Indução

O medidor eletromecânico de indução[39], consiste basicamente de um disco de alumínio montado sobre duas bobinas, sendo que uma delas produz um fluxo magnético proporcional à tensão, enquanto a outra produz um fluxo proporcional à corrente. Os campos magnéticos produzem correntes induzidas sobre o disco (de onde surge o termo “medidor de indução”), sendo que as bobinas são montadas de forma que surja uma força proporcional ao produto da tensão pela corrente instantânea que faz o disco girar. Um ímã permanente próximo ao disco produz uma força oposta proporcional à velocidade de rotação do disco, que age como um freio fazendo o disco parar quando a potência ativa for nula. Desta forma, o disco gira em uma velocidade proporcional à potência consumida. O disco de alumínio está conectado a um sistema de engrenagens que fazem girar uma série de diais, que por sua vez registram o número de voltas do disco e informam o total de energia consumida. Este tipo de medidor tem normalmente uma incerteza de medição da ordem de 2% do valor monitorado.

Figura 3.1 – Mecanismo de um medidor eletromecânico de indução. (1) - Bobina de tensão. (2) Bobina de corrente. (3) Estator que concentra e confina o campo magnético. (4) - Disco rotor de alumínio. (5) - Ímã de frenagem do rotor. (6) - Engrenagem para transmissão do giro. (7) - Conjunto de ponteiros com os mostradores.

3.1.2 Medidores Eletrônicos

Nos medidores eletrônicos [40] a corrente normalmente não é medida diretamente, mas por meio de transformadores de corrente, enquanto a tensão pode ser medida tanto por meio de divisores resistivos de alta impedância quanto por transformadores de tensão. Neste tipo de medidor as incertezas de medição são da ordem de 0,5 a 1% da energia monitorada.

3.1.2.1 Medidor Eletrônico Estático

Nestes medidores os sinais de corrente e tensão agem sobre elementos de estado sólido (circuitos eletrônicos analógicos) para produzir uma informação de saída proporcional à quantidade de energia elétrica medida. Esta informação pode ser contabilizada por meio de contadores digitais ou mesmo por meio de sistemas mecânicos. Nesta linha existem também circuitos integrados dedicados que recebem os sinais de corrente e tensão e geram pulsos proporcionais à energia consumida, entretanto em alguns destes circuitos é realizado um processamento digital interno.

dos ângulos está sujeita a erros. O cálculo fasorial também é sensível à variação na frequência instantânea da rede. O melhor procedimento é a realização do cálculo numérico das potências.

A potência ativa pode ser obtida diretamente da multiplicação ponto a ponto do sinal de corrente pelo sinal de tensão, sendo que para cada ciclo de 60 Hz pode-se utilizar:

$$P = \frac{\sum_{i=1}^n (V_i \times I_i)}{n} \quad (3.1)$$

onde P é a potência ativa do sistema, V_i a tensão instantânea aplicada na amostragem i , I_i a corrente instantânea medida na amostragem i , e n o número de amostragens efetuadas na medição.

Já o módulo da potência aparente pode ser obtido diretamente da multiplicação do valor eficaz da tensão pelo valor eficaz da corrente:

$$I_{EF} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (I_{[j]})^2}{n}} \quad (3.2)$$

$$V_{EF} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (V_{[j]})^2}{n}} \quad (3.3)$$

$$S = I_{EF} V_{EF} \quad (3.4)$$

onde I_{EF} é a corrente eficaz do sistema, V_{EF} a tensão eficaz, S é a potência aparente do sistema e n é o número de amostragens efetuado. O módulo da potência reativa pode ser calculado então por:

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} \quad (3.5)$$

onde Q é a potência reativa do sistema. Neste caso, como o sinal de Q é perdido, deve-se observar o ângulo do fator de potência, obtido diretamente pela defasagem entre a corrente e a tensão, para saber se Q é positivo ou negativo.

3.3 Interfaces e Tecnologias Utilizadas no Tratamento dos Sinais dos Medidores

Para a instalação de um sistema de automação da medição de energia elétrica residencial, podem ser adotadas interfaces de acordo com a necessidade de utilização específica do projeto, conforme descrito a seguir.

3.3.1 Medidores Eletromecânicos com Saída de Pulso

Podem ser utilizados tanto medidores com saída de pulso, quanto recondicionar medidores convencionais adaptando-os aos mesmos sensores ópticos que gerem este tipo de saída. Neste caso, o circuito eletrônico a ser adaptado ao medidor é bastante simples, sendo composto basicamente de uma CPU digital que recebe os pulsos de energia por meio de uma entrada digital, totalizando os mesmos e armazenado o valor em uma memória não volátil.

Além disso, a CPU deve possuir um canal de comunicação para a exteriorização dos dados. Esta é uma das opções mais simples e de custo reduzido (considerando-se que os medidores existentes serão reutilizados com custo reduzido de adaptação), sendo que seu principal inconveniente é o tamanho da montagem final, maior do que o de um medidor eletrônico dedicado, porém este geralmente não é um fator crítico.

3.3.2 Medidores Eletrônicos

Os medidores de mercado normalmente já possuem um sistema de memória não volátil e portas de comunicação serial. Em alguns casos como, por exemplo, a leitura de *smartcards* é necessária acoplar um periférico ao medidor.

3.3.3 Medidores Eletrônicos Dedicados

Para uma opção de sistema de custo reduzido produzido em larga escala, a opção de construir um medidor eletrônico dedicado torna-se bastante interessante, pois o mesmo pode ser totalmente customizado para uma dada aplicação específica. Nesses medidores podem ser implementados circuitos integrados dedicados para cálculo de potência que geram pulsos proporcionais ao consumo, o que dispensa os conversores A/D e reduz a necessidade de processamento. Outra opção são os microcontroladores de custos acessíveis que já possuem uma série de periféricos internos, inclusive conversores A/D. Para certas aplicações, um medidor dedicado pode custar quase o mesmo preço dos medidores convencionais adaptados, com a vantagem de possuir dimensões bem mais reduzidas, o que permitiria, por exemplo,

que em um sistema antifurto o medidor fosse alojado em uma caixa que poderia ser fixada no próprio cabo de tomada de alimentação.

3.4 Tecnologias de Comunicação Consideradas

Nos sistemas de automação da medição descritos a seguir serão consideradas basicamente as seguintes formas de comunicação:

- **Comunicação com coletor de dados** – Esta comunicação normalmente pode ser implementada por meio de sinais infravermelhos, mas em alguns casos, onde a distância é maior, pode ser necessário o uso de transmissão via rádio.
- **Comunicação com uso do telefone do consumidor** – Esta é uma opção de custo reduzido, pois usa uma linha já disponível, mas depende da aceitação deste uso por parte do consumidor.
- **Comunicação por meio de *smartcard*** – Esta é a forma utilizada basicamente nos sistemas pré-pagos.
- **Sistemas de comunicação dedicados** – Existem diversos tipos de sistema de comunicação dedicados que podem usar redes sem fio e PLC.

3.5 Sistemas Antifraude nos Processos de Medição

Conforme citado anteriormente, um dos principais meios para evitar fraude nos medidores e também furtos de energia por meio de circuitos que “contornem” o medidor (*bypass*) é a colocação da medição no poste, junto à tomada de energia. Desta forma o acesso ao medidor fica bastante dificultado, o que praticamente elimina a possibilidade da adulteração do mesmo. Além disso, qualquer tomada paralela de energia somente será possível com uma ligação direta de um cabo à rede de baixa tensão (“gato”) que é facilmente perceptível com uma simples inspeção visual. Este tipo de solução já está sendo adotada por algumas distribuidoras, sendo um caso onde o custo da automação do processo de medição se justifica em função de elevados valores de perdas comerciais. Este tipo de sistema tem alguns requisitos importantes que devem ser observados:

- Deve ser instalado um display em local acessível que permita ao consumidor ler a quantidade de energia que está sendo indicada pelo medidor;

- É recomendável a instalação de um sistema de corte e religamento automático, pois neste caso o acesso ao medidor para este tipo de operação fica bastante dificultado;
- É recomendável que algum sistema de comunicação seja disponibilizado, que permita a automação da leitura e também o envio de comandos de corte e religamento. Este sistema pode ser tanto uma interface para comunicação com coletor de dados manual, como também um sistema mais completo que se comunique com uma central.

Considerando a questão da minimização dos custos deste tipo de sistema, uma das melhores técnicas consiste no reaproveitamento dos medidores eletromecânicos existentes, e também no uso de um mesmo sistema eletrônico para leitura de diversos medidores, como mostrado na figura 3.3, onde um mesmo equipamento atende até oito consumidores. Na figura 3.4 são mostradas as principais partes deste tipo de sistema. Os relés que estão em série com o medidor fazem parte do sistema de corte e religamento automático.

Figura 3.3 – Esboço de ligação física no qual cada equipamento antifraude pode atender até oito consumidores

Figura 3.4 – Disposição interna dos principais componentes de um sistema antifraude que atenda até oito consumidores. Para efeito de visualização a parte de potência foi representada apenas para um dos medidores.

O display para a leitura do consumo pode ser implementado tanto com dígitos individuais de sete segmentos, como também por meio de displays de cristal líquido conforme mostrado na figura 3.5. Normalmente o display ficará apagado, sendo ligado somente quando o usuário pressionar um botão.

Figura 3.5 – Diversos tipos de displays disponíveis no mercado

Um ponto a ser definido é a forma de comunicação entre o módulo que irá conter o display e o sistema de totalização e controle, que pode ser:

- **Ligação por um par de fios** – Apesar de ser a opção mais simples traz o inconveniente de que este fio irá correr em paralelo com os cabos de energia, sendo um ponto de entrada de ruído para o sistema eletrônico;
- **Ligação sem fios** - Uma ligação por rádio frequência pode ser implementada sem muitos problemas, pois a distância entre o display e o sistema totalizador é pequena;
- **Ligação PLC** – A ligação com o display pode ser realizada por meio da tecnologia de Power Line Communication [22], com um modem de custo reduzido.

A solução a ser adotada deve ser aquela que atenda às necessidades técnicas com o menor custo possível.

3.5.1 Circuito de Totalização e Controle

O circuito de totalização e controle realiza as seguintes funções:

- Recebe informações de até oito medidores, sob a forma de pulsos que indicam o número de voltas dado por cada disco de medição. A entrada de pulsos é basicamente uma entrada digital onde o sinal de tensão proveniente do medidor é convertido em uma informação binária;
- Envia dados para oito módulos de display indicando o valor de energia totalizada;
- Controla os sistemas de corte e acionamento dos oito circuitos de saída. Este controle é feito basicamente por meio de relés de potência, que tanto podem ser relés eletromagnéticos ou de estado sólido;
- Comunica-se opcionalmente com coletores de dados portáteis, sendo que neste caso a ligação deve ser feita por rádio frequência devido à maior distância. Uma outra opção é colocar o ponto de comunicação junto ao display, viabilizando, assim, o uso de um sistema infravermelho;
- Comunica-se opcionalmente com uma central da concessionária por meio de um sistema dedicado.

O circuito de totalização demanda uma capacidade de processamento muito pequena, pois são lidos somente oito canais digitais que variam em uma frequência muito baixa (inferior a 10Hz) e, além disso, estes sinais devem ser apenas totalizados em um conjunto de

oito contadores sem necessidade de nenhum tratamento adicional. Nas operações de corte e religamento deve ser processado um algoritmo de criptografia que garanta a segurança na operação e evite acessos indevidos. De forma geral o circuito de totalização e controle demanda o uso de uma CPU digital com as seguintes características:

- Baixa capacidade de processamento;
- Memória de dados não volátil para armazenamento dos valores medidos;
- Rápida inicialização quando ligada ou resetada;
- Possuir circuito que evite o travamento do microcontrolador (watch-dog timer);
- Possuir no mínimo oito entradas digitais para leitura dos pulsos de medição;
- Possuir de oito a dezesseis saídas digitais para controle dos relés de corte e religamento. No caso de relés com duplo estado, os mesmos demandam dois sinais de controle, um para acionamento e outro desacionamento;
- Possuir pelo menos dois canais seriais de comunicação, um para enviar informações para o display e outro para conexão com uma central ou com um coletor de dados.

3.6 Sistema de Tarifação Diferenciada

A tarifação diferenciada para a tarifa amarela é tecnicamente muito simples de ser realizada, pois basta utilizar dois totalizadores, um que é incrementado no período de ponta e o outro fora da ponta. Neste caso o sistema deve possuir também um relógio interno que permita a leitura da hora com um erro máximo de alguns segundos. Como os relógios de custo reduzido podem apresentar uma variação da ordem de alguns segundo por ano, o relógio do medidor terá que ser reajustado com uma periodicidade mensal, ou no máximo, semestral.

Umas das configurações mais econômicas deste tipo de sistema é a apresentada na figura 3.6 onde um medidor eletromecânico é interligado a um totalizador eletrônico dotado de um display.

Figura 3.6 – Medidor com display para tarifação diferenciada

Neste caso é recomendável o uso de um display alfanumérico, pois uma série de informações deverão ser registradas e mostradas, dentre elas:

- Data e hora do relógio interno;
- Consumo dentro do horário de ponta;
- Consumo fora do horário de ponta;
- Início e término do horário de ponta.

Um botão de seleção deverá ser utilizado para ir de uma informação a outra, sendo que após algum tempo o display deve se apagar automaticamente.

O totalizador deverá ter uma CPU com características muito semelhantes às da CPU do sistema antifraude descrito no item anterior, incluindo um relógio interno com bateria que funcione mesmo quando o equipamento não estiver recebendo energia.

A comunicação do totalizador com um coletor portátil poderá ser feita, neste caso, através de sinais infravermelhos, o que é facilitado pelo fato do medidor estar em um local acessível. Opcionalmente pode-se ter um canal de comunicação com uma central da distribuidora. Esta ligação poderá ser realizada por meio do próprio telefone do usuário ou por um sistema dedicado.

3.7 Sistema de Pré-Pago

O sistema pré-pago utiliza basicamente o mesmo esquema apresentado no item anterior, no entanto, além de totalizar os pulsos de medição, o equipamento deverá ser capaz de interromper o fornecimento de energia, devendo ficar em série com o medidor, conforme mostrado na figura 3.7. Neste caso, um relógio interno também é necessário para evitar o desligamento à noite e nos fins de semana.

Figura 3.7 – Sistema pré-pago

Neste tipo de sistema a energia é liberada das seguintes formas:

- Com uso de um cartão “inteligente” (*smartcard*);
- Por meio de um código digitado em um teclado numérico no próprio medidor;
- Remotamente, através da Internet.

Em cada um destes casos o totalizador deve ser dotado de um dispositivo adicional (leitor de cartão ou teclado) que pode fazer parte do totalizador ou ser conectado como um periférico externo. Neste tipo de sistema os dados são criptografados para manter a segurança, e desta forma a CPU deve ter uma capacidade de processamento adequada para esta demanda.

No display serão apresentadas informações do saldo do consumidor em valores de energia e também em moeda corrente, e o medidor deve ser capaz de emitir um alarme quando os créditos estiverem se esgotando, o que pode ser feito por meio de uma indicação sonora associada a uma mensagem no display.

Este é um dos poucos casos onde a comunicação com uma central ou com um coletor de dados é totalmente dispensável: para a opção com *smartcard* e com entrada de código via teclado. Entretanto, a comunicação com uma central pode ser muito mais segura, no sentido de que um sistema pré-pago está mais sujeito a fraudes por não estar sob uma supervisão mais direta e contínua da concessionária, e desta forma um canal de comunicação possibilitaria um acompanhamento mais próximo e permitiria a detecção automática de alguns tipos de fraude.

3.8 Sistemas Mistos e Funções de Qualidade de Energia

Esse tipo de automação também gera a possibilidade de implementações de sistemas mais completos, com múltiplas funcionalidades, como por exemplo, um sistema antifurto com tarifação diferenciada ou ainda um sistema pré-pago que implemente também a tarifa amarela.

Neste caso, basta reunir as exigências de cada tipo de sistema compondo uma aplicação mista, somando os requisitos de aquisição, apresentação de informações e comunicação.

Como os medidores eletromecânicos podem ser obtidos e reconicionados para geração de pulsos a um custo muito baixo, considerando-se o reaproveitamento dos medidores existentes, eles acabam se tornando a opção mais acessível para todos os sistemas de automação citados, pois as unidades de processamento adicionais utilizadas neste caso são muito simples e acessíveis.

Um ponto adicional a ser considerado é a possibilidade de utilizar o processo de automação do medidor para a implantação de um sistema de coleta de dados sobre a qualidade da energia fornecida, o que pode incluir níveis de regulação da tensão, níveis de harmônicos na tensão e também variações momentâneas e interrupção de energia. Além disso, poderiam ser obtidas informações sobre as curvas de demanda e também sobre o fator de potência. Nestes casos, a implementação de um medidor eletrônico dedicado seria plenamente justificada, pois com a simples adaptação dos medidores eletromecânicos não seria possível efetuar medições relativas à qualidade de energia.

CAPÍTULO 4 – Sistemas de Comunicação

Este capítulo apresenta os principais sistemas de comunicação que podem ser utilizados para a automação da medição de energia elétrica aplicada a consumidores residenciais.

4.1 Sistemas de Comunicação sem Fio

Os sistemas de comunicação sem fio têm por base a transmissão de informações por meio de ondas eletromagnéticas, mas aplicam tecnologias bem distintas para esta transmissão. Podem ser divididos basicamente em quatro grandes blocos, em função da distância de transmissão: rádio, satélite, redes locais sem fio e comunicação celular.

4.2 Sistemas de Comunicação via Rádio

4.2.1. Comunicação Via Rádio Operando em HF

Os sistemas rádio operando em *HF* ocupam uma faixa compreendida entre 3 e 30 MHz do espectro da rádio frequência (RF) [20], [21] e possibilitam comunicação a longa distância (superiores a 150 km) para canais de voz e dados que operam a baixa velocidade. Neste tipo de sistema a distância máxima e a qualidade da comunicação são afetadas pelas condições ionosféricas (fator limitador do alcance), potência de transmissão, ganho da antena e também níveis de ruído natural e provocado pelo homem.

Os equipamentos de rádio que operam em *HF* atualmente estão caindo em desuso devido ao número reduzido de canais disponíveis e a problemas de interferência verificados principalmente em equipamentos mais antigos. Além disso, o aumento da disponibilidade de outros meios de comunicação, como por exemplo, o sistema de comunicação celular, tornou a aplicação dos rádios *HF* em grande parte desnecessária.

Atualmente existem no mercado equipamentos de transmissão via rádio mais robustos, com maior seletividade e menor largura de banda, de tal forma a reduzir os problemas de interferências, tornando possível a cobertura de longas distâncias, utilizando poucas estações repetidoras.

4.2.2. Comunicação Via Rádio Operando em VHF

Os sistemas de rádio que operam em *VHF* ocupam a faixa compreendida entre 30 e 300 MHz do espectro de *RF*. São utilizados principalmente na comunicação de voz e dados de baixa velocidade para distâncias inferiores a 70 km. As limitações dos sinais de *VHF* devem-se a variações lentas do sinal devido ao índice de refração do ar, variações rápidas do sinal devido às perturbações atmosféricas e também provocadas pelo homem, tipo de topografia do terreno, atenuação crescente com a frequência, ganho e casamento das antenas. Esse sistema é uma alternativa ao sistema *HF* para a comunicação em longas distâncias, principalmente pela facilidade proporcionada pelos equipamentos de rádio móveis e portáteis, em especial os equipamentos digitalizados que permitem interfaces com equipamentos de comutação local.

Pelas características dos sinais propagados na faixa de *VHF*, é necessário um número razoável de estações repetidoras para cobrir distâncias maiores do que 70 km. Para sua utilização em longas linhas de transmissão recomenda-se o uso de 15 repetidores em média para cada 1000 km de linha, o que é um fator limitante para sua utilização nesse tipo de aplicação.

4.2.3. Comunicação Via Rádio FSK

O Sistema de modulação *FSK* (*Frequency Shift Keying*) (sintonia por deslocamento de frequência) [21], [22] desloca a frequência da portadora do transmissor entre dois pontos fixos separados (figura 4.1). A cada deslocamento de frequência ou fase atribui-se um valor binário que efetivamente irá conduzir a informação.

Figura 4.1 – Modulação FSK

O *FSK* foi originalmente desenvolvido para envio de textos através de dispositivos de rádio teleimpressor. Conforme a evolução da tecnologia, o *FSK* foi também usado para a

transmissão de mensagens binárias representando textos em código ASCII e arquivos de dados em geral. A grande desvantagem do *FSK* é a necessidade de um equipamento de recepção mais elaborado. Encontramos rádios FSK no mercado operando na faixa de 400 MHz sendo que o alcance típico vai de alguns quilômetros a poucas centenas de metros, dependendo da potência dos transmissores. O alcance está diretamente ligado à potência da transmissão, e neste caso, como a comunicação é unidirecional, pode-se obter uma boa abrangência com baixo consumo de energia, pois o transmissor fica a maior parte do tempo desligado, transmitindo somente quando necessário.

4.2.4. Comunicação Via Rádio por Microonda

Os rádios de microondas [20], [21] operam no espectro de frequência de Gigahertz e têm normalmente capacidade de transmitir um grande número de canais de voz (tipicamente na faixa de 1000 a 2000 canais) que podem ser agrupados por meio de modulação analógica ou ainda digitalizados e multiplexados em blocos de dados binários.

A utilização de antenas em formato parabólico permite gerar feixes de microondas direcionais, pois como as microondas se propagam em linha reta, uma antena deve obrigatoriamente “ver” a outra. Em função da curvatura da terra e dos acidentes do terreno, a antena também deve ser instalada em um ponto relativamente alto. A distância típica entre duas antenas é da ordem de 40 km, desta forma, em um sistema de microondas é comum a existência de uma série de estações repetidoras situadas geralmente no topo de pontos altos (morros, prédios, etc.). Além disso, os sinais que saem do transmissor para a antena não são transportados por cabos condutores, mas sim por guias de onda.

Desta forma o conjunto composto pelo multiplexador, rádio de microondas, guias de onda, torre e antenas compõem um equipamento caro e volumoso. Mas dado o grande número de canais disponíveis, esse sistema acaba sendo mais viável do que a passagem de cabos telefônicos para interligação de centros que se encontram a centenas de quilômetros de distância.

A transmissão de dados via microondas é afetada por condições climáticas (nevoeiro, chuva) que tendem a absorvê-las. Os sistemas devem ser planejados com distâncias máximas e potências de transmissão que garantam a recepção de um nível mínimo de sinal mesmo sob as piores condições de tempo previstas para uma dada região.

Muitas empresas transmissoras de energia operam sistemas próprios de rádio de microondas, mas com a popularização e redução dos custos da transmissão por fibra óptica, estas tecnologias tendem a não ser utilizadas para este caso particular.

4.2.5. Padrão ZigBee

Conforme [62], hoje em dia há uma forte tendência das redes wireless comerciais estarem no contexto das redes locais (*WLAN*), tanto em soluções proprietárias como nos padrões desenvolvidos por entidades como o *IEEE*. Devido a crescente evolução das tecnologias das redes sem fio, as mesmas passaram a atender não só as aplicações corporativas mais complexas como também as de pequenos volumes de dados que não exigem altas taxas de transmissão como, por exemplo, o controle de equipamentos eletroeletrônicos.

Além disso [62], outras tecnologias sem fio têm sido utilizadas também com o objetivo de proporcionar a comunicação pessoal e o controle de dispositivos diversos, as chamadas redes pessoais (*WPAN*). A principal base dessas tecnologias é de poder permitir o controle remoto de equipamentos domésticos (televisores, videocassetes, geladeiras, etc.) e periféricos (teclados, mouse, impressoras, etc.), eliminando o uso dos cabos e se tornando mais prática a operação desses equipamentos pelos usuários.

A tecnologia [62] mais recente dentro desse grupo de redes para aplicações pessoais e que permite o gerenciamento e controle desses dispositivos é o padrão [42], um padrão de comunicação que segue à norma IEEE 802.15.4, homologado em maio de 2003. O padrão ZigBee foi desenvolvido para se tornar uma alternativa de comunicação em redes que não necessitem de soluções mais complexas para seu controle, reduzindo os custos com a aquisição, instalação de equipamentos, manutenção e mão de obra. Trata-se de uma tecnologia relativamente simples, que utiliza um protocolo de pacotes de dados com características específicas, sendo projetado para oferecer flexibilidade quanto aos tipos de dispositivos que pode controlar.

A *ZigBee Alliance* [62], que desenvolve o padrão ZigBee junto ao IEEE, é uma associação que conta com mais de 45 empresas trabalhando em conjunto para desenvolver um padrão capaz de possibilitar um controle seguro, de custo reduzido e baixa potência em redes sem fio para o controle de diversos equipamentos, incluindo soluções para a automação predial, aplicações em telemetria e entretenimento.

Os dispositivos embasados na tecnologia ZigBee, conforme [62], operam na faixa *ISM*, (Industrial, Scientific, Medical) centrada em 2,45 *GHz* que não requerem licença para funcionamento, incluindo as faixas de 2,4 *GHz* (Global), 915Mhz (América) e 868Mhz (Europa), com taxas de transferência de dados de 250kbps em 2,4GHz, 40kbps em 915Mhz e 20kbps em 868Mhz. O padrão oferece atualmente interfaces com velocidades de conexão

compreendidas entre 10Kbps e 115Kbps e com um alcance de transmissão entre 10m e 100m, dependendo diretamente da potência dos equipamentos e de características ambientais (obstáculos físicos, interferência eletromagnética, etc.).

Referente ao problema de alimentação dos dispositivos, afirma [62], os módulos de controle dotados com esta nova tecnologia podem ser alimentados até mesmo por baterias comuns, sendo que sua vida útil está relacionada diretamente com a capacidade da bateria e à aplicação a que se destina. Pensando nesse contexto, o protocolo ZigBee foi projetado para suportar aplicações com o mínimo de consumo (com pilhas comuns, um dispositivo pode funcionar até 6 meses).

A figura 4.2 mostra uma comparação entre diversas tecnologias de transmissão sem fio (*wireless*) na qual se pode observar a aplicação do ZigBee para taxas de transmissão da ordem de 1 kbps a 250 kbps. No caso da necessidade de taxas mais elevadas, outros padrões de comunicação devem ser adotados, como o *Bluetooth* e o *Wi Fi (Wireless Fidelity)*. É possível observar também que esses protocolos operam em distâncias curtas (até 100m), e que para a transmissão a distâncias mais elevadas observa-se um segmento representado por redes proprietárias operando em baixas taxas de transmissão, que são implementadas basicamente por meio das tecnologias de rádio *HF*, *VHF* e digital.

Figura 4.2 – Comparação entre protocolos de comunicação wireless (fonte ZigBee Alliance)

O padrão de comunicação *ZigBee*[62] é atualmente a aplicação que se mostra mais adequada para a obtenção de uma rede de comunicação sem fio de curto alcance e de custo reduzido. Além disso, existem no mercado diversos fabricantes que fornecem a solução necessária para a implementação do *ZigBee* em um único chip, tornando fácil sua utilização em um projeto.

4.2.6. Padrão Bluetooth

O *Bluetooth*, conforme [43], é um padrão de comunicação sem fio desenvolvido pela *Ericsson* na década de 90. Em 1998, as empresas *Ericsson*, *Nokia*, *IBM*, *Intel* e *Toshiba* formaram o consórcio denominado *Bluetooth SIG* (*Special Interest Group*), com o objetivo de expandir e promover a tecnologia *Bluetooth* e estabelecer um novo padrão industrial. O nome *Bluetooth* é uma homenagem ao unificador da Dinamarca, o rei *Harald Blatand*, mais conhecido como *Harald Bluetooth*. A idéia desse padrão era basicamente eliminar a necessidade de cabos na comunicação entre dispositivos, mas com o andamento do projeto, ficou claro que as aplicações de uma tecnologia desse tipo eram ilimitadas.

As principais aplicações do *Bluetooth* no mercado são:

- Comunicação entre o PC ou *laptop* e impressoras, *scanners* ou rede local;
- Eliminação dos cabos para o mouse e teclado;
- Dispositivos identificadores pessoais que podem se comunicar com outros dispositivos em uma residência, permitindo automação residencial (após chegar em casa, o morador é identificado automaticamente, a porta se destrava e as luzes são acesas, por exemplo);
- Cartões de crédito que podem ser debitados automaticamente em uma compra.

Os dispositivos *Bluetooth* [43] também operam na faixa *ISM*, e sua tecnologia de rádio provê uma comunicação segura e robusta, mesmo em ambientes com alto ruído, mas com alcance limitado a algumas dezenas de metros.

A especificação *Bluetooth*, afirma [43], visa à criação de um sistema de rádio, onde não há diferença entre as suas unidades, ou seja, não há distinção entre estações base e terminais como nas redes convencionais de sistemas de telefonia celular. Também não há infra-estrutura de cabos para suportar a conectividade entre unidades portáteis; não há um controlador central para coordenar as interconexões e nem intervenção de operadores. Em ambientes *Bluetooth* é comum que um grande número de conexões coexistam na mesma área sem qualquer coordenação mútua entre os dispositivos.

Os dispositivos *Bluetooth* [43] se comunicam entre si e formam uma rede denominada *piconet*, na qual podem existir até oito dispositivos interligados, sendo um deles o mestre e os outros dispositivos escravos. Tipicamente, nas aplicações *Bluetooth* várias *piconets* independentes e não-sincronizadas podem se sobrepor ou existir na mesma área. Neste caso,

forma-se um sistema disperso denominado *scatternet*, composto de múltiplas redes, cada uma contendo um número limitado de dispositivos, conforme mostrado na figura 4.3.

Figura 4.3 – Arquitetura de Redes Bluetooth

O padrão *Bluetooth*[43], apesar de apresentar diversas vantagens, tem um custo relativamente alto e não se tornou tão popularizado quanto seus idealizadores previam inicialmente, tornando sua aplicação inviável atualmente para uso na automação da medição de energia elétrica.

4.2.7. Comunicação via Satélite de Órbita Alta

Os sistemas de comunicação via satélite de órbita alta utilizam satélites conhecidos como geoestacionários, pois se encontram posicionados a uma altitude de 35.786 km sobre a linha do Equador e se deslocam com velocidade angular idêntica a da Terra, o que faz com que pareçam fixos no espaço. Atualmente existem centenas de satélites geoestacionários dos mais diversos tipos em órbita na Terra, sendo que boa parte deles são dedicados à comunicação [44]. Um destes sistemas de satélites é o consórcio *Inmarsat* que é formado por 79 países incluindo o Brasil. O *Inmarsat* destinava-se inicialmente a prover apenas comunicação marítima, sendo ampliado posteriormente para atender a comunicações aeronáuticas e terrestres. O sistema *Inmarsat* consiste de uma rede de nove satélites em órbita geoestacionária posicionados em torno da linha equatorial, cada um cobrindo uma região oceânica (Pacífico, Índico, Atlântico Oeste e Atlântico Leste), e uma rede de 40 estações terrestres espalhadas em 31 países, sendo que uma delas encontra-se instalada no Rio de Janeiro. O Brasil é coberto por dois satélites que abrangem praticamente todo o território nacional. Por operar em órbita geoestacionária, o sistema *Inmarsat* é bastante afetado pelo

tempo de propagação do sinal (o tempo de subida e descida é da ordem de 240 ms), e necessita de equipamentos mais potentes por parte dos usuários. A aplicação mais comum desse sistema são os *links* para transmissão de voz e dados a uma taxa de até 128 kbps. Devido aos elevados custos dos equipamentos e também do aluguel do canal de comunicação, este tipo de aplicação fica praticamente restrito a locais de difícil acesso, não atendidos pelos sistemas convencionais.

4.2.8. Comunicação via Satélite de Órbita Baixa

As constelações de satélites operando em baixa órbita [60], se encontram em uma faixa compreendida entre 644 e 2.575 km de altitude, com velocidade angular superiores às da Terra, ou seja, eles não são estacionários em relação ao planeta. Um dos sistemas que operam no Brasil é o consórcio *Globalstar*, formado por operadoras e fabricantes de equipamentos de telecomunicações, constituído de 48 satélites operando a 1.414 km de altitude, colocados em oito planos orbitais com seis satélites cada e com diversas estações terrestres espalhadas pelo mundo, sendo três delas no Brasil (Manaus, Petrolina e Presidente Prudente). Esse sistema cobre aproximadamente 65% do globo terrestre.

A grande vantagem deste sistema é a cobertura nacional, e apesar do custo dos equipamentos e do canal de comunicação ainda serem relativamente elevados (custos de equipamentos na faixa de R\$ 2.000,00 e operação na faixa de R\$ 5,00 por minuto de uso), para locais remotos e com baixas taxas de utilização esta é uma das opções de comunicação mais acessíveis disponíveis.

Um outro sistema que opera no país é *ORBCOMM*, que é constituído por um conjunto de 36 satélites, que orbitam a uma altura média de 800 km, com período de revolução sobre a Terra de 100 minutos, e que perfazem uma cobertura total do planeta. Os satélites orbitam em 6 órbitas elípticas em planos diferenciados com relação à sua inclinação ao Equador. O sistema *ORBCOMM* tem sido muito utilizado na comunicação com sistemas de automação e controle que demandem baixas taxas de transmissão, como por exemplo, em tarefas de rastreamento de frotas de veículos onde um transmissor informa por períodos fixos onde o mesmo se encontra. Este tipo de sistema tem um custo de instalação na ordem de R\$ 500,00 e sua operação é proporcional ao número de kilobytes transmitidos durante o mês (R\$ 5,00 por cada 10 kbytes transmitidos). No sistema *ORBCOMM* o satélite recebe pacote de mensagens de um dado equipamento, que são repassados a uma central em terra, esta central por sua vez transmite os dados para um endereço IP (na Internet), sendo que um dado pacote leva em média um minuto para chegar até o destino.

4.2.9. Comunicação via Telefonia Celular

Os Laboratórios *Bell*, da *AT&T*, desenvolveram o conceito do celular [45] em 1947, sendo que em 1970 a própria *AT&T* propôs a construção do primeiro sistema telefônico celular de alta capacidade que ficou conhecido pela sigla *AMPS* (*Advanced Mobile Phone Service*). No entanto, foi a *NTT* (*Nippon Telephone & Telegraph*) a primeira a colocar um sistema celular semelhante ao *AMPS* em operação em 1979 na cidade de Tóquio, no Japão.

Os sistemas de comunicação celular de primeira geração eram bastante parecidos entre si, sendo que as principais diferenças concentravam-se no uso do espectro de frequência e no espaçamento entre canais. O *AMPS*, por exemplo, opera na faixa de 869-894 MHz para recepção e 824-849 MHz para transmissão com espaçamento de canais de 30 kHz. Essa primeira geração de sistemas celulares caracterizava-se basicamente por ser analógica, utilizando modulação em frequência para voz e modulação digital *FSK* para sinalização e controle. O acesso à canalização é obtido através de *FDMA* (*Frequency Division Multiple Access*). O tamanho das células situa-se na faixa de 500 metros a 10 quilômetros, sendo permitido o “*handoff*” ou “*handover*” (permite a transferência automática de ligações de uma célula para outra). Possibilita igualmente o “*roaming*” (transferência automática de ligações entre sistemas) entre os diferentes provedores de serviço, desde que adotem o mesmo sistema.

A segunda geração de sistemas móveis caracteriza-se, em geral, pela utilização de tecnologia digital para transmissão tanto de voz quanto de sinalização, estando baseada principalmente (80% do mercado) no padrão *GSM* (*Global Standard Mobile*) que foi adotado como padrão europeu em meados dos anos 80 e introduzido comercialmente em 1992, operando na faixa de frequência de 935-960 MHz para recepção e 890-915 MHz para transmissão. O *GSM* é baseado na tecnologia *TDMA* (*Time Division Multiple Access*), ou seja, opera dividindo o tempo de um canal em certo número de partes e designando cada uma das diversas conversações telefônicas para cada uma dessas partes. Além disso, o *GSM* possui uma arquitetura aberta, o que permite a combinação de equipamentos de diferentes fabricantes, possibilitando assim a manutenção de preços baixos.

Mesmo quando os sistemas de segunda geração ainda não estavam totalmente amadurecidos e estabelecidos, já se trabalhava intensamente no desenvolvimento da terceira geração. Este trabalho foi liderado mais uma vez pela Europa e pelo Japão. O objetivo do sistema móvel de terceira geração (*G3*) foi suportar diversas facilidades:

- Manter uma compatibilidade básica com o sistema *GPS*;

- Permitir portadoras realocáveis, banda atribuível sob demanda (por exemplo, 2 Mbps para comunicações em ambientes internos e pelo menos 144 kbps para ambientes externos);
- Possibilitar variedade de tipos de tráfego compartilhando o mesmo meio;
- Ter uma tarifação adequada para aplicações multimídia;
- Apresentar facilidade de implementação de novos serviços (por exemplo, utilizando ferramentas de rede inteligente);
- Permitir acesso digital em banda larga na faixa de 200Kbps até 2Mbps.

Em 2004 a *T-Mobile*, segunda maior operadora de telefonia celular da Europa, começou a vender aparelhos *G3*, sendo que uma das vantagens mais divulgadas deste tipo de sistema é a facilidade de conexão dos *laptops* às redes de banda larga de terceira geração.

Atualmente, no Brasil a tecnologia *GSM* ainda está sendo gradualmente consolidada e as operadoras de *GSM* já garantem o *roaming* (comunicação àqueles assinantes que viajam para cidades fora de sua base) nacional nas maiores cidades e em todas as capitais brasileiras. A tecnologia *G3* deverá ser inicialmente implantada no Brasil por volta de 2008, com uma migração bem mais suave do que a que foi observada na passagem da tecnologia analógica para a digital. Assim, a tecnologia *GSM* tenderá a evoluir gradativamente para a prestação de serviços de terceira geração, e deverá suportar velocidades de transmissão superiores a 384 kbps, o que viabilizará ainda mais a transmissão de fotos, músicas e imagens e também a conexão de *notebooks* por meio de celulares. Dentro da tecnologia *GSM* um serviço que se destaca é o *SMS* (*Short Message Service*) no qual curtas mensagens de texto podem ser enviadas de um aparelho para outro ou mesmo entre um aparelho e um servidor na *Internet*.

4.3 Sistemas de Comunicação com Fios ou Fibras Ópticas

Os sistemas de comunicação por fio [46] podem ser divididos basicamente em:

- Sistemas de telefonia fixa;
- Linhas dedicadas e sistemas dedicados.

Neste tipo de sistema as informações são transmitidas por meio de sinais elétricos que se propagam em fios metálicos ou sinais luminosos e fibras ópticas.

Nos sistemas de telefonia fixa um cabo contendo dezenas de pares trançados de fios de cobre é lançado (normalmente utilizando os postes da rede elétrica) entre uma central telefônica e diversos quadros de distribuição na rua, onde serão conectados os assinantes do

sistema. Inicialmente as diversas centrais em uma mesma cidade também eram conectadas por meio de fios de cobre, mas com o advento das centrais digitais a maior parte destas conexões passou a ser feita por meio de cabos de fibra óptica que permitem altas taxas de transmissão. A comunicação entre centrais de diferentes cidades e mesmo entre diferentes países é realizada por meio de diversos tipos de tecnologia, incluindo links de rádio (na faixa de microondas), satélites e até mesmo cabos submarinos, sendo que os antigos cabos de cobre estão sendo atualmente substituídos por cabos de fibra óptica.

As linhas e sistemas de comunicação por fios dedicados podem ser encontrados em diversos níveis, como por exemplo:

- Redes de computadores utilizadas dentro de universidades e empresas;
- Centrais telefônicas privadas utilizadas em hotéis, empresas e residências;
- Linhas privadas que conectam filiais próximas de uma mesma empresa;
- Linhas privadas que conectam sistemas de monitoração em locais isolados;
- Sistemas de comunicação utilizados dentro das empresas do setor elétrico para a operação de subestações e usinas.

A própria base da *Internet* é formada pela conexão de diversos sistemas de comunicação privados em que parte das conexões são feitas por meio de sistemas de telefonia fixa ou móvel. A transformação de um sinal de dados para o padrão de comunicação da telefonia (projetado inicialmente para voz, mas atualmente utilizado amplamente na comunicação de dados) é feita através de *Modems* (*Moduladores/Demoduladores*).

4.3.1 Modems Convencionais

Os *modems* convencionais operam em linhas telefônicas discadas sempre em uma ligação direta com outro *modem*. A taxa máxima de transmissão obtida em um *modem* convencional é da ordem de 57Kbps, mas dependendo da distância da ligação e da qualidade da linha este valor pode ser bem menor.

Para aplicação de modems dentro de subestações de energia elétrica devem ser tomados cuidados especiais, pois o potencial de terra de uma subestação pode ser momentaneamente elevado para a faixa de centenas ou mesmo milhares de volts. Neste caso, como o par telefônico é referenciado ao terra da central telefônica, observa-se o surgimento de um potencial elevado entre o mesmo e o terra da subestação que pode danificar seriamente o modem e os equipamentos e ele conectados. Uma boa solução, neste caso, é o uso de um modem externo conectado ao equipamento por meio de um cabo de fibra óptica e, além disso,

alimentado com uma fonte com alto grau de isolamento. Desta forma o modem não é conectado à terra da subestação, o que evita a queima do mesmo quando do surgimento de potenciais elevados entre o terra da subestação e a linha telefônica.

4.3.2 Modem ADSL

O sistema *ADSL* (*Asymmetrical Digital Subscriber Line*) é uma tecnologia de comunicação que vem sendo difundida no mercado brasileiro há cerca de 5 anos e que possibilita uma taxa de transmissão de 300 a 1000Kbps, a custos relativamente reduzidos e sem limite de uso. Esta tecnologia está revolucionando o acesso doméstico à *Internet*, possibilitando um acesso rápido a conteúdos de informação e também o uso de comunicação de voz sobre IP.

O custo de um modem *ADSL* é relativamente baixo (na faixa de US\$70,00 a US\$ 100,00), sendo que para 300 kbps os custos de operação se situam na faixa de US\$40,00 mensais, independentemente do tempo de conexão. Além disso, é importante citar que o padrão *ADSL* compartilha uma linha de voz que pode ser utilizada simultaneamente com a comunicação de dados.

4.3.3 Modems de Custos Acessíveis

Para casos especiais onde baixas taxas de transmissão são necessárias existem diversas alternativas que reduzem bastante o custo dos *modems*. Um exemplo disso é o uso do próprio sistema *DTMF* (*Dual Tone Multi Frequency*), que é utilizado na discagem e pode ser usado também como meio de transmissão de informação em uma taxa de aproximadamente 5 bps, o que já é suficiente, por exemplo, para transmitir um valor de consumo mensal de energia.

4.4 Power Line Communication

O padrão *Power Line Communication* (*PLC*) [22] basicamente utiliza os cabos de distribuição de energia elétrica como meio de transmissão de dados. A principal vantagem do *PLC* sobre os outros padrões de comunicação é a utilização de uma infra-estrutura física já existente, pois praticamente em todos os pontos de comunicação a serem instalados existirá também um ponto de energia elétrica próximo. Por outro lado, as linhas de potência são um dos meios mais inóspitos à comunicação de dados, apresentando as seguintes desvantagens:

- Atenuação de acordo com a frequência: divisores de tensão, acoplamento entre fases;

- Atraso;
- Ruído impulsivo: interruptores, aparelhos domésticos, motores, *dimmers*;
- Falta de segurança.

Além disso, as primeiras empresas interessadas em desenvolver a tecnologia *PLC* enfrentaram outros tipos de problemas: alto custo de desenvolvimento, falta de regulamentação e limitação de banda útil. Apesar desses problemas, a *PLC* já vem sendo aplicada há mais de 30 anos.

A seguir são descritas em linhas gerais as diversas tecnologias de comunicação *PLC* disponíveis no mercado, considerando também seus aspectos históricos.

4.4.1 Sistema Carrier

Os primeiros sistemas *PLC* [22] foram empregados há cerca de 30 anos em linhas de média e alta tensão (69kV a 500kV), através de um sistema que ficou conhecido dentro das empresas transmissoras como *Carrier*. Consistia basicamente de uns poucos canais de voz modulados em AM e transmitidos pela linha com auxílio de filtros passa – alta com alto nível de isolamento, capazes de bloquear totalmente os sinais de 60 Hz transmitindo somente a onda portadora (na faixa de 300 kHz).

Os canais disponíveis no sistema carrier eram utilizados tanto para a comunicação com operadores de subestações como para conexão de equipamentos de tele proteção. A figura 4.3 mostra um equipamento que faz parte do sistema *Carrier* do fabricante ABB.

Figura 4.4 – Equipamento do sistema Carrier do fabricante Asea Brown Boveri

Com o advento das tecnologias de rádio de microondas e cabos de fibras ópticas sendo instalados nas linhas de transmissão, o sistema *Carrier* caiu em desuso devido ao baixo número de canais disponíveis e a problemas de manutenção. Um ponto crítico do Sistema Carrier que afeta principalmente o seu uso em sistemas de tele proteção é que durante as faltas na linha de transmissão (momento em que a teleproteção é mais necessária), a comunicação

pode ser afetada devido a grandes níveis de ruídos gerados durante a falta, e até mesmo devido à interrupção da linha.

4.4.2 Power Frequency

As tecnologias *PLC* de modulação em "power frequency" [48] foram desenvolvidas especificamente para comunicação entre equipamentos remotos instalados ao longo de um ramal de distribuição e um concentrador instalado dentro da subestação. Esta comunicação é feita a uma taxa bastante reduzida com um controle de fluxo em esquema mestre-escravo, no qual o concentrador atua como mestre e interroga periodicamente os equipamentos instalados no ramal de distribuição. A modulação *power frequency* tem um princípio bastante simples que consiste no envio de pulsos a uma taxa de 120 Hz em uma faixa estreita próxima ao ponto em que a tensão é igual a zero. Neste sistema são utilizados dois tipos de modulação: *outbound* e *inbound*. A modulação *outbound* é baseada na geração de um pulso de tensão sendo utilizada para a comunicação no sentido subestação para equipamento remoto, enquanto a modulação *inbound* é baseada em um pulso de corrente sendo utilizada para a comunicação no sentido do equipamento remoto para a subestação. Apesar dos pulsos de corrente e de tensão serem bastante curtos (da ordem de 100 a 200 microssegundos) sua frequência fundamental é baixa o suficiente (5 a 10 kHz) para que os mesmos possam ser transmitidos sem problemas pelos transformadores instalados nos postes, trafegando, assim, tanto na média tensão (13 kV) como na baixa tensão (110/220 V). Este sistema permite a implementação de um canal de comunicação para cada fase, com velocidade de transmissão de 120bps. Existem diversos esquemas de codificação como, por exemplo, o uso de pulsos de polaridade invertida para a diferenciação entre o bit zero e o bit um, ou ainda a associação da existência do pulso ao bit um e da ausência do mesmo ao bit zero. Para maior confiabilidade, a informação do bit pode ser repetida nos dois semiciclos, mas neste caso a taxa passa a ser de apenas 60 Hz, o que parece pouco, mas atende tranqüilamente aos sistemas de automação da medição de energia elétrica e mesmo a sistemas de telecontrole de bancos de capacitores e remotas de poste.

A grande vantagem deste sistema é que o concentrador instalado dentro da subestação pode se comunicar com qualquer equipamento ligado em qualquer ponto do ramal de distribuição. As principais desvantagens da modulação em *power frequency* são as seguintes:

- O sistema pode ser afetado devido a interferências geradas em cargas de maior consumo;

- Os sinais transmitidos se propagam por todo o ramal de distribuição e apesar de serem de baixa amplitude (comparados com a amplitude do sinal senoidal de tensão), os mesmos podem ser caracterizados como ruídos sobrepostos ao sinal de tensão e podem afetar ou gerar interferências em alguns equipamentos elétricos e eletrônicos;
- Para atingir todo o ramal os equipamentos devem operar com uma potência relativamente elevada, principalmente no caso do concentrador que deve “forçar” um pulso de tensão sobre o sistema de média tensão.

4.4.3 Protocolo X-10

A tecnologia *PLC* com uso do protocolo *X-10* existe há mais de vinte anos [49] e foi criada inicialmente para integrar custo reduzido e controle de equipamentos na rede elétrica. Geralmente, os módulos transmissores do *X-10* são adaptadores que, conectados à tomada de energia enviam sinais aos módulos receptores para controlar equipamentos simples como interruptores, controles-remoto, sensores de presença, entre outros. De forma semelhante à modulação *power frequency*, as transmissões *X-10* são sincronizadas no ponto de *zero crossing* da curva de tensão. No caso do *X-10*, ao invés de um único pulso de baixa frequência é utilizada uma modulação AM com uma portadora na faixa de 120 kHz e duração na faixa de 50 a 100 microssegundos. Os receptores possuem filtros sintonizados na frequência do sinal aplicado, o que minimiza bastante o problema de ruídos na rede. Como o protocolo *X-10* utiliza sinais de frequência bem maior do que os da rede, os mesmos são filtrados pelos equipamentos disponíveis nas residências e também pelos transformadores, sendo, portanto, o alcance do *X-10* bem mais limitado do que o *power frequency*. Além disso, o padrão *X-10* utiliza potências de transmissão bem menores, gerando menor ruído na linha, minimizando os custos e tornando sua operação mais confiável e menos prejudicial ao sistema elétrico em relação ao padrão *power frequency*.

Tanto no caso do *X-10* como para os sistemas que operam com taxas bem maiores, os próprios transformadores de distribuição formam uma barreira natural para transmissão das portadoras utilizadas. Caso seja interessante transportar os sinais gerados pelos equipamentos *PLC* para o lado de média tensão, podem ser utilizadas pontes passivas que são formadas por capacitores de alta tensão conectando os lados de alta e baixa tensão dos transformadores. É possível também a utilização de acoplamento indutivo e de equipamentos repetidores que conectem dois sistemas de baixa tensão, sem trafegar pela média tensão.

4.4.4 Modulação OFDM

A técnica de modulação OFDM (*Orthogonal Frequency-Division Multiplexing*) [50] foi criada visando minimizar a interferência entre canais de frequência próximos uns aos outros e está baseada na propriedade da ortogonalidade entre sinais (dois sinais são ditos ortogonais, quando a multiplicação de um pelo outro resulta em zero). Esta técnica permite a transmissão de grandes volumes de dados através da divisão da faixa de frequência de operação do sistema em diversos *slots* de frequência, onde os pacotes são transmitidos simultaneamente para o receptor. É uma tecnologia complexa e exige processamento digital de sinais múltiplos, no entanto, oferece diversos benefícios, entre eles:

- Maior número de canais para uma mesma faixa espectral;
- Resistência à interferência RF;
- Pouca distorção causada por caminhos múltiplos.

Este último tópico citado é importante, pois em um típico cenário de *broadcast* os sinais transmitidos chegam ao receptor através de vários caminhos de diferentes comprimentos (*multipath-channels*). Como versões múltiplas de um sinal interferem umas nas outras (*inter symbol interference*) torna-se extremamente difícil extrair a informação original.

4.4.5 Spread Spectrum

O padrão *Spread Spectrum* [51] é caracterizado por uma técnica de modulação que não utiliza portadora, mas sim um sinal de “ruído” de espectro espalhado, sendo o seu ponto forte a rejeição de interferências na transmissão de informação.

Uma modulação *spread spectrum* satisfaz duas definições:

- É uma forma de transmissão na qual a informação ocupa uma banda maior que a banda mínima para transmiti-la;
- O espalhamento do espectro é realizado antes da transmissão através do uso de um código independente da informação. O mesmo código é usado pelo receptor para recuperar a informação original.

Esta modulação “sacrifica” a eficiência em termos de banda e potência em *prol* da segurança nas transmissões em ambientes hostis. Quando o sinal é espalhado no espectro de potência, ele fica com a aparência de um sinal de ruído, podendo ser transmitido pelo canal sem ser detectado por quem possa estar monitorando a comunicação. A Figura 4.5 mostra

como se comporta o espectro de potência para um sinal espalhado comparando-o com um sinal de banda base utilizado, por exemplo, em modulação AM.

Figura 4.5 – Densidade espectral de um sinal em banda base e um sinal “espalhado”

As vantagens da modulação *spread spectrum* são:

- Baixa densidade espectral de potência;
- Rejeição a interferências;
- Privacidade: o código usado para o espalhamento tem baixa ou nenhuma correlação com o sinal e é único para cada usuário, sendo impossível separar do sinal a informação que está sendo transmitida sem o conhecimento do código utilizado.

Nas aplicações em *PLC*, a modulação *spread spectrum*, também é conhecida como *SSC* (*spread spectrum carrier*), em que dois esquemas principais de modulação são utilizados:

- *FH-SS* (*Frequency Hopping Spread Spectrum*): A banda total do canal de transmissão é dividida em diversos sub-canais de banda estreita e o sistema comuta rapidamente entre eles segundo uma sequência aleatória e conhecida tanto pelo transmissor como pelo receptor.
- *DS-SS* (*Direct Sequence Spread Spectrum*): Utiliza um canal de banda larga (>1Mhz) onde todos transmitem a uma alta taxa de *chips* (símbolos binários) segundo uma sequência que segue um código aleatório predefinido (pseudo ruído). Este pseudo ruído é um sinal binário produzido a uma frequência muito maior que o dado a ser transmitido, espalhando o sinal no domínio frequência. Na recepção o sinal é filtrado segundo a mesma sequência.

- Sistema híbrido *DS/FH*: A banda é dividida em sub-canais e em cada um deles um pseudo ruído é multiplicado com o sinal de dados. Um endereço é a combinação da sequência das frequências e o código do pseudo ruído.

Da mesma forma que *OFDM* a *SSC* é aplicada como forma de modulação em contextos mais amplos de tecnologias *PLC*, alguns dos quais são descritos a seguir.

4.4.6 Protocolo CEBus

O protocolo *CEBus* (*Consumer Electronics Bus*) [52] foi desenvolvido para a comunicação de produtos eletro-eletrônicos em redes elétricas residências e comerciais, e utiliza a tecnologia *Spread Spectrum Carrier (SSC)*. O espalhamento dos símbolos é de 100 kHz a 400 kHz, e cada símbolo tem duração de 100 μ s, o que fornece uma taxa de transmissão de 10 kbps.

O *CEBus* utiliza o modelo de comunicação ponto-a-ponto e adota a técnica *CSMA/CDR* (*Carrier Sense Multiple Access/Collision Detection and Resolution*) para evitar colisão dos dados.

4.4.7 Comunicação Lon Works

O padrão *Lon Works* [53] baseia-se no uso de modulação por frequência única para a transmissão de pacotes pela rede elétrica, e utiliza a tecnologia de *Dual Carrier Frequency (DCF)* [54], escolhidas de acordo com a menor atenuação provocada pela rede elétrica. Os protocolos que a tecnologia *DCF* utiliza permitem a comunicação de dados a uma taxa de 5 a 10 kbps. O *Lon Works* oferece uma infra-estrutura para a operação de rede local denominada *LON* (*Local Operating Network*) que utiliza o protocolo de comunicação proprietário *Lon Talk*. Nos sistemas *PLC* são utilizadas comunicações ponto-a-ponto, adotando o protocolo *CSMA* como estratégia de acesso ao meio, funcionando a uma taxa de 10 kbps. Esta é uma tecnologia de custo relativamente elevado sendo mais utilizada em ambientes industriais, e afastando-se de usuários domésticos.

4.4.8 Comunicação Adaptive Networks

A *Adaptive Networks* [55] também utiliza a tecnologia *spread spectrum*, mas oferece *chip sets* com taxas de 19,2 kbps e 100 kbps. O acesso ao meio é feito através de um “*hybrid token passing*”, que minimiza *tokens* desnecessários em ambientes com cargas leves e preserva integridade do *token* em situações de muita carga. Apesar de possibilitar taxas de

transmissão maiores que as anteriormente mencionadas, a tecnologia da *Adaptive* não é adequada para aplicações banda larga como compartilhamento de arquivos, voz digital e transmissão de vídeo. Seus *chip sets* ainda são muito caros para serem incorporados a produtos destinados a consumidores residenciais ou de pequenos escritórios.

4.4.9 PLUG-IN

O padrão *PLUG-IN* [56] foi desenvolvido pela *Intelogis Inc.* e está baseada na implementação de vários protocolos: *PLUG-IN Intelogis Common Application Language* (iCAL), o *PLUG-IN Power Line Exchange* (PLX) e o *PLUG-IN Digital Power Line* (DPL). Ao contrário dos demais protocolos, que utilizam comunicação ponto-a-ponto, o iCAL utiliza uma arquitetura cliente-servidor que permite armazenar a inteligência de cada nó da rede em um nó central denominado Servidor de Aplicações. As tarefas que exigem grande processamento, inteligência e armazenamento são realizadas por este nó central, deixando os nós clientes com a mínima inteligência e circuito necessário para executarem suas funções. Consequentemente, o custo do sistema cai enormemente. O PLX tem como principal função definir o protocolo de controle de acesso ao meio. Este protocolo utiliza dois mecanismos independentes: *DSMA* (*Datagram Sensing Multiple Access*) e *CTP* (*Centralized Token Passing*). O servidor atual da rede é um nó que foi inserido com a utilização do *DSMA* e é responsável pelo gerenciamento do *token*.

O *PLUG-IN DPL* é um conjunto de regras que definem como a informação é transmitida pelos componentes (*transceivers*) da rede. A modulação utilizada é *FSK*, cujo valor de custo é bastante inferior ao custo de produção dos circuitos para modulação por *spread spectrum*. As taxas de transmissão chegam a 350 kbps. Estas características fazem com que esta tecnologia seja muito bem aceita em aplicações comerciais e residenciais.

4.4.10 Comunicação via GPRS

O sistema de comunicação GPRS (General Packet Radio Service), conforme [61], é uma nova solução, não baseado em voz, que permite o envio e recepção de informações através de uma rede telefônica móvel. O mesmo suplementa as tecnologias atuais de CSD (Circuit Switched Data) e SMS (Short Message Service), e não está relacionado ao GPS (Sistema de Posicionamento Global).

Referente à *velocidade*, o GPRS possui taxas de transferência teóricas de até 171,2 kbps (kilobits por segundo), isto é uma taxa de transferência próxima de três vezes mais rápida do que as possíveis nas redes de telecomunicações fixas e dez vezes mais que os atuais serviços de CSD nas redes GSM. No entanto, na prática essa taxa de transferência gira em torno dos 40 kbps.

Quanto à *disponibilidade*, o GPRS facilita conexões instantâneas pois a informação pode ser enviada ou recebida imediatamente conforme a necessidade do usuário. Não há necessidade de conexões dial-up através de modems. Com isso, pode-se dizer que os usuários de GPRS estão “sempre conectados”. A disponibilidade imediata é uma das vantagens de GPRS (e SMS) quando comparado com CSD. Alta disponibilidade imediata é uma característica muito importante para aplicações críticas como autorização remota de lançamento em cartões de crédito, envio de dados referente à medição de energia de consumidores ao centro de operação de concessionárias, facilita novas aplicações, não disponíveis através das redes GSM, dadas as limitações na taxa de transferência dos CSDs (9,6 kbps) e do tamanho da mensagem no SMS (160 caracteres).

Com o GPRS, conforme[61], a informação é dividida em “pacotes” relacionados entre si antes de ser transmitida e remontada no destinatário. A comutação de pacotes é semelhante a um jogo de quebra-cabeças, a imagem que o quebra-cabeças representa é dividida em pequenas peças pelo fabricante e colocada em um saco plástico. Durante o transporte do quebra-cabeças entre a fábrica e o comprador, as peças são misturadas. Quando o comprador do jogo retira as peças da embalagem ele as remonta, formando a imagem original. Todas as peças são relacionadas entre si e se encaixam, mas a forma como são transportadas e remontadas varia. A Internet é um outro exemplo de rede de dados baseada em comutação de pacotes, o mais conhecido de todos os tipos de rede.

4.4.11 Escolha do meio de Comunicação

Levando-se em consideração o estudo feito referente aos meios de comunicação existentes e ao estado da arte em que se encontra a tecnologia de rede sem fio (wireless) no mundo, optou-se pelo padrão de comunicação ZigBee e GPRS, conforme será abordado nos capítulos posteriores.

CAPÍTULO 5 - Metodologia para Implementação do Sistema Proposto

Neste capítulo será apresentada a metodologia utilizada para desenvolvimento de um sistema de automação da medição de consumo residencial, cujo objetivo é a minimização de perdas comerciais devido a fraudes. Essa metodologia consiste basicamente em:

- Definição de filosofia geral de operação do sistema;
- Especificação do sistema anti-fraude;
- Definição e detalhamento de arquitetura de hardware a ser utilizada;
- Definição de formas de instalação do sistema;
- Definição de formas de operação e comunicação;
- Desenvolvimento dos equipamentos e softwares associados;
- Instalação e testes em campo.

5.1 Conceito de Operação do Sistema Antifraude

O conceito desse sistema antifraude consiste em deslocar a etapa de medição da residência do consumidor, efetuando-a em um local de difícil acesso, de forma a evitar que o medidor seja violado ou adulterado de forma a indicar um consumo menor. Essa modificação torna a possibilidade de fraude praticamente nula. Para reduzir ainda mais essa probabilidade, o medidor deverá ser instalado no poste dentro de um painel fechado com uma chave, com supervisão eletrônica de violação, que avisará a central de operação quando aberta. Esse sistema de automação deve resolver os problemas citados, com um custo reduzido de instalação e operação. Analisando esses aspectos, existem diversas possibilidades técnicas que deverão ser detalhadas:

- Uso de medidores eletrônicos de custo reduzido ou o reaproveitamento dos medidores existentes;
- Continuar com uma forma de leitura manual (com uso de coletores de dados) ou implantar um sistema de comunicação com uma central;
- Uso de tecnologias de comunicação sem fio para leitura remota dos medidores ou uso de tecnologias PLC (Power Line Communication), ou mesmo transmissão via infravermelho.

Considerando-se todas as possibilidades citadas, podem ser definidas diversas

combinações de arquiteturas diferentes, cada uma com vantagens e desvantagens associadas. No presente trabalho foi enfocada uma solução específica onde se obteve custo reduzido com um alto grau de automação.

5.1.1 Abrangência do Sistema Antifraude

As áreas viáveis para a implementação do sistema proposto localizam-se em regiões de grandes centros urbanos ou bairros residenciais e comerciais, onde há alta concentração de fraudes, com elevados números de ligações elétricas clandestinas. Visando à redução de custos, a base do projeto é a exteriorização e concentração da medição de energia em baixa tensão dessas regiões, mantendo a utilização de medidores convencionais dotados de saída de pulsos proporcional à energia consumida em kWh ou usando medidores eletrônicos de custo reduzido. Dentro deste conceito, os medidores serão retirados do padrão de entrada da unidade consumidora e acondicionados em caixas nos postes de distribuição de rua, sendo que, no padrão de entrada da unidade consumidora, será instalado um *display* para a averiguação do consumo.

O sistema será dotado de um módulo concentrador para 8 medidores com saída de pulsos, que coletará os pulsos provenientes dos medidores e totalizará as informações de consumo enviadas por meio de interface de comunicação sem fio para os displays correspondentes de cada unidade consumidora.

O módulo concentrador deverá enviar os valores totalizados de consumo de cada unidade consumidora, reproduzindo o mostrador do medidor de energia, porém terá ainda a possibilidade de enviar adicionalmente outras informações, como o consumo do último mês em kWh, curva de carga, entre outros.

Em uma primeira etapa o módulo concentrador deverá comunicar-se com um Palm para configuração, instalação e leitura de consumo através de comunicação *wireless* (padrão *ZigBee*), em seguida, diversos módulos concentradores poderão ser instalados em sequência compondo uma rede *wireless* onde a informação será passada de um concentrador para outro até chegar a um concentrador dotado de comunicação via modem GPRS ou convencional.

5.1.2 Levantamento da Posição do Módulo Concentrador

A princípio, seleciona-se a região com as residências para a instalação do módulo concentrador, que deve ser instalado no poste já existente, seguindo as normas de posicionamento de altura da concessionária para a sua fixação. Em seguida, os 8

consumidores mais próximos que farão parte deste concentrador deverão ser cadastrados, de tal forma que a distância máxima entre este concentrador e o consumidor mais distante não exceda a distância máxima permitida pela rede *wireless*, que neste caso é de 100 metros sem a necessidade de antena amplificadora para reforçar o sinal.

Considerando-se que a distância média entre cada poste é de 35 metros, o comprimento da frente de cada residência ou estabelecimento comercial é em média de 5 metros, a largura da rua é em média de 5 metros e cada lado da calçada tem média de 2 metros, obtém-se uma distância máxima entre o módulo concentrador e o seu respectivo módulo display do consumidor mais distante, de tal forma que não exceda o raio de alcance máximo do enlace *ZigBee*.

Cada módulo display deve ser fixado no lugar do antigo relógio, mas poderá ser fixado em um local escolhido pelo consumidor em sua residência, respeitando a posição, para que o mesmo também esteja no raio de alcance do módulo concentrador.

Concluída a instalação física de cada módulo concentrador e os seus respectivos módulos displays, iniciam-se os testes com a energização dos mesmos, e com um microcomputador conectado ao módulo concentrador, utiliza-se o software de reconhecimento de cada display cadastrado. Após o reconhecimento dos displays por cada módulo concentrador, tem-se a certeza que a instalação está correta, bem como a posição de cada módulo concentrador.

5.2 Arquitetura do Sistema Antifraude

Na figura 5.1 é apresentada a arquitetura do sistema antifraude proposto implementado através de uma série de equipamentos distintos:

- **Módulo concentrador:** Equipamento que coleta informações de consumo de até 8 medidores através de entradas de pulso de energia. O concentrador possui internamente um modem *ZigBee* e pode se comunicar opcionalmente via interface RS-232 com um modem convencional ou mesmo um modem GPRS ou PLC;
- **Módulo de corte / Religamento:** Este módulo comanda oito relés de potência que realizam as operações de corte e religamento de cada consumidor monitorado;
- **Fonte de alimentação:** Equipamento que recebe tensão AC gerando um sinal de 5VDC e outro de 24VDC para alimentação do sistema.

Figura 5.1 – Arquitetura do sistema antifraude proposto

5.3 Instalação do Sistema Antifraude

5.3.1 Instalação Módulo Concentrador

De acordo com a NBR 5434 [57], a distância entre os postes de distribuição varia entre 30 e 60 m. Considerando-se uma região com 1400 consumidores e 175 postes, tem-se 8 consumidores para cada poste, e desta forma, cada módulo concentrador fixado no poste fará a leitura de 8 consumidores de tal modo que a distância entre o módulo concentrador e o módulo display nunca ultrapasse o alcance máximo obtido pela comunicação wireless (*ZigBee*).

A caixa com o módulo concentrador será fixada no poste a uma altura mínima de 4m, conforme mostra a figura 5.2 e figura 5.3 Nesta caixa serão também instalados até oito medidores eletromecânicos (um para cada consumidor monitorado) bem como os relés para corte e religamento automático e a fonte de alimentação.

Figura 5.2 – Instalação do módulo concentrador no poste com os displays residenciais

Figura 5.3 – Diagrama esquemático do módulo concentrador que irá interno à caixa.

5.3.2 Características da Caixa que Abriga o Módulo Concentrador

A caixa que abrigará o módulo concentrador, o módulo de corte e religamento e os medidores de energia com saída pulsada será fixada nos postes de distribuição de rua de onde serão derivadas as saídas para as residências. Para que isso seja possível, esta caixa deverá atender aos seguintes requisitos mínimos:

- Fator de proteção IP65;
- Sensoriamento de violação (conectado ao módulo concentrador);
- Proteção contra vandalismo e fraude (parafusos especiais e vedação);
- Facilidade de instalação e remoção;
- Dimensões reduzidas (baixo impacto visual).

5.3.3 Instalação do Display

O módulo display, ao ser instalado em uma unidade consumidora, deverá enviar via *ZigBee* seu número identificador denominado código de Identificação do Display (ID) e o módulo concentrador deverá armazenar este número e aguardar o procedimento de instalação. O módulo concentrador, ao receber um código ID de um módulo *display*, deve verificar se este pertence à sua lista de módulos instalados. Caso pertença deverá enviar o valor do consumo de energia, ao contrário, deverá guardar em uma outra lista de módulos não instalados até que o procedimento de instalação via *Palm* seja inicializado.

Para iniciar o processo de instalação, o operador deverá pressionar o botão específico do módulo display. O módulo concentrador, ao receber esse pulso verificará que se trata de aviso de instalação e aguardará o início do protocolo de comunicação com o *Palm* para dar início ao processo.

O instalador deverá iniciar o software aplicativo de instalação no *Palm*, que solicitará ao módulo concentrador o número de identificação, e também os ID's dos módulos *displays* armazenados.

O software do *Palm* apresentará ao instalador as seguintes informações:

- Número do módulo concentrador atual;
- Lista dos displays novos;
- Campo para digitar o número do medidor ou ler através da leitora de código de barras;
- Campo para digitar o valor inicial dos medidores;

- Campo para digitar o Kp ou Kd dos medidores;
- Campo para associar a unidade consumidora agora formada por um número de medidor e um ID de display com o canal de entrada de pulso correspondente do módulo concentrador.

5.4 Procedimentos de Operação e Comunicação

5.4.1 Tecnologia de Comunicação Utilizada

Inicialmente estava prevista a comunicação por PLC entre o módulo concentrador e o *display* e *Bluetooth*, entre o módulo concentrador e o *Palm*, porém os estudos realizados mostraram diversas vantagens na utilização de uma nova tecnologia de comunicação *wireless* de baixo alcance, denominada *ZigBee*, que apresenta um custo muito inferior se comparada à utilização de PLC ou *Bluetooth*.

A utilização desta tecnologia como alternativa ao PLC sugeriu a substituição da tecnologia *Bluetooth* pela *ZigBee* na implementação da comunicação entre o *Palm* e o módulo concentrador, bem como, as implementações adicionais desta tecnologia, como alternativa de comunicação entre o módulo *display* e o módulo concentrador.

5.4.2 Procedimentos de Comunicação com o Display

Para fazer a leitura, o usuário deverá manter pressionado o botão do módulo display até que apareça a informação de consumo. O módulo *display* permanecerá desligado até que o botão seja pressionado, então enviará o ID pela rede broadcast ao módulo concentrador correspondente, que irá devolver o valor de consumo. Os módulos concentradores que estiverem próximos irão receber a solicitação do *display* e deverão verificar se pertencem às suas listas para decidir a resposta. Um vez que diversos módulos concentradores podem ser instalados dentro de uma mesma área de cobertura dos sinais de RF, cada módulo concentrador possuirá uma lista de *displays* que pertencem à sua gerência, devendo responder aos comandos somente dos *displays* que pertencerem à respectiva lista.

5.4.3 Procedimentos de Comunicação com Coletor Portátil

Numa primeira etapa de operação o sistema antifraude poderá se comunicar com coletores de dados portáteis, implementados por meio de *Palmtops* com interface de comunicação *ZigBee*. Neste caso o leiturista deverá se aproximar a menos de 100 metros do

sistema e ativar uma função de comunicação na qual o Palm irá emitir um pedido de identificação via interface *ZigBee*, verificando quais concentradores se encontram em sua proximidade. Cada concentrador terá um código de identificação previamente cadastrado no software do Palm e após estabelecido o contato, os valores de medição serão atualizados na base de dados do *Palm* referentes àquele medidor. O leiturista poderá também ativar funções específicas para realizar uma função de corte ou religamento de um dado consumidor monitorado pelo concentrador.

5.4.4 Procedimentos de Comunicação em Rede

Em uma segunda etapa de operação do sistema antifraude, os diversos concentradores que se encontram em uma mesma região poderão compor uma rede *ZigBee* na qual cada equipamento “enxerga” dois equipamentos vizinhos e com eles se comunica. Neste caso, os pacotes de informação podem ser transmitidos de um concentrador para o outro até chegarem a todos os equipamentos da rede. Obviamente este é um sistema que não permite um processo de comunicação em alta velocidade, pois existe um tempo de latência para que a informação seja propagada de um concentrador para o outro. Entretanto, como o volume de informação a ser transmitido é muito pequeno (basicamente valores de monitoração e comandos de corte e religamento), esta forma de comunicação em rede *ZigBee* deve atender muito bem à demanda. Na “ponta” de cada rede *ZigBee* será instalada uma unidade central de comunicação que poderá ser um equipamento de comunicação dedicado com interface *ZigBee*. A unidade central de comunicação poderá ser o próprio módulo concentrador dotado de um modem celular *GPRS*. Esta comunicação poderá utilizar protocolo TCP/IP, facilitando a integração deste sistema com os sistemas de gerenciamento de hierarquia superior (faturamento, medição e supervisão da rede de distribuição).

A implantação de uma rede de equipamentos de medição instalados ao longo de um ramal de distribuição que se comunicam por meio de tecnologia *ZigBee* abrirá um vasto leque de possibilidades para a concessionária, não somente no que diz respeito ao transporte de informações para suas próprias aplicações, como é o caso, mas também criando um novo canal de comunicação que poderá ser utilizado para a prestação de outros serviços ao consumidor. Entre eles poderá ser incluso o serviço de monitoração de segurança, tarifação integrada de todos os insumos de uma residência (energia, água e gás).

Outro avanço será o estudo das melhores técnicas a serem empregadas na exteriorização das medições e se, de fato, este deverá ser o caminho a ser seguido, buscando inicialmente a otimização dos custos de leitura e a redução das perdas comerciais e abrindo

também outras possibilidades, como é o caso da tarifação diferenciada, na qual o consumidor se beneficia com uma energia de custo reduzido e ajuda a aliviar a carga no horário de pico.

5.4.5 Ilustração do Sistema Proposto para a Medição de Energia

Figura 5.4 – Sistema Proposto para a Medição de Energia

5.4.6 Flexibilidade de expansão do Módulo Concentrador

Em função das dimensões atuais dos medidores eletromecânicos, determinou-se que inicialmente a caixa do módulo concentrador suportaria somente 8 medidores, não excedendo o tamanho máximo de 925x600x475mm, atendendo as normas conforme [57] e [63], no entanto, a medida em que os medidores forem evoluindo e diminuindo as suas dimensões, o módulo concentrador estará preparado para suportar a futura expansão.

CAPÍTULO 6 - Estudo de Caso

O sistema antifraude desenvolvido neste trabalho foi proposto para a concessionária Bandeirante Energia dentro do programa de P&D da ANEEL. Como a área de estudo da presente dissertação contemplava desde o início do trabalho a questão dos sistemas da medição de energia com foco no combate à fraude e ao furto de energia, foi possível aliar o estudo teórico com a construção prática de um projeto-piloto de sistema antifraude para a Bandeirante Energia. Neste capítulo será descrito o projeto de pesquisa e desenvolvimento do sistema de medição antifurto realizado.

6.1 O Problema Enfrentado pela Bandeirante Energia

A área de abrangência da Bandeirante Energia apresenta uma elevada heterogeneidade, que demanda soluções específicas para cada localidade atendida e que em muitos casos não encontram soluções dentro das alternativas disponíveis no mercado para atendimento às suas necessidades, seja por limitações técnicas, seja pela sua inviabilidade mercadológica. A área onde se pretende implementar um sistema de medição antifraude através de módulos concentradores, que compreende a região da cidade de Guarulhos e cercanias é, em sua grande maioria, composta por populações das classes C e D que normalmente constroem suas habitações sem projetos, sendo tipicamente atendidas por autoconstruções.

Os problemas sócio-econômicos enfrentados por esta população levam a práticas que buscam adequar seu perfil de despesas à sua reduzida renda. Entre as mais comuns, está a prática dos chamados "gatos"(ligações clandestinas) nas instalações elétricas residenciais. Por questão cultural, dentro destas comunidades, tal prática não é considerada um delito e sim uma forma de administração de suas necessidades. A mudança cultural neste segmento, apesar de factível, demandará intenso trabalho por meio de informações e pelo uso intensivo de novas tecnologias.

Outro fator que demanda um estudo para sua solução é representado pelo elevado índice de rejeição de ligações encontrado na região pela falta de adequação dos padrões de entrada às especificações técnicas da concessionária. Os transtornos para o consumidor e para a concessionária são evidentes, demandando novas visitas dos eletricitistas, bem como despesas

com a adequação dos padrões por parte dos consumidores, para serem atendidas as suas solicitações de ligação da energia elétrica.

Como referência, atualmente, o custo de um padrão de entrada, segundo as normas da Bandeirante é estimado em R\$ 100,00, sendo de total responsabilidade do consumidor. A quantidade de ligações rejeitadas no último ano para esta região foi de 10% dos pedidos efetuados pelos clientes, e isto causa uma perda de faturamento para a Bandeirante até a regularização do padrão de entrada do cliente.

Atualmente, a Bandeirante conta com um parque instalado de transformadores em Delta que necessitam serem substituídos por transformadores em Y, segundo o padrão atualmente adotado. Isto implicará na troca dos medidores junto aos clientes e na modificação dos padrões de entrada atuais, provocando inúmeros transtornos à população.

O sistema antifraude que está sendo desenvolvido buscará solucionar os problemas acima descritos, na medida em que deslocará a medição de energia da residência do consumidor para um ponto de melhor controle, o poste de distribuição. Isto, porém, não é por si só uma solução, o módulo concentrador de medição permitirá a implementação de uma solução que possibilitará a Bandeirante criar novas práticas de tarifação para o consumidor, buscando atender à sua necessidade de planejamento de gastos.

Em recente análise no mercado da disponibilidade de soluções similares, verificou-se que, ou por questões tecnológicas ou por questões de inviabilidade mercadológica, não se encontrou disponível uma solução que ofereça todas as facilidades aqui previstas, razão esta que levou a Bandeirante a optar pelo desenvolvimento de um projeto de P&D para a obtenção de um sistema antifraude que atenda a todas as suas necessidades específicas.

6.2 Desenvolvimento do Sistema de Antifraude

Foi proposto um sistema antifraude, composto basicamente de equipamentos para medição concentrada que agrupam até 8 medidores eletromecânicos em um único local com acesso restrito. Em janeiro de 2005 foi iniciado o desenvolvimento de um sistema piloto a ser implementado em 20 meses para atender 120 unidades consumidoras, constituído dos seguintes equipamentos:

- 15 Módulos concentradores com capacidade de leitura de 8 medidores/cada;
- 15 Caixas externas de medição, a serem instaladas em poste de distribuição;
- 120 Módulos displays residenciais, a serem instalados nas residências.

Neste projeto-piloto tem-se um caso real, onde todos os produtos desenvolvidos durante a pesquisa poderão ser validados em campo. Não foram previstos, neste caso, os serviços de integração dos módulos concentradores com os sistemas de gestão de Faturamento, Medição, COS (Centro de Operação) e Call Center o que poderá ser realizado em uma etapa posterior.

6.2.1 Cronograma para Implementação da Solução

O sistema proposto está sendo executado em dois anos, sendo que cada ano é composto de uma série de etapas, como segue:

Ano I:

- Etapa 1 (2 meses) - Levantamento de dados e descritivo funcional do produto;
- Etapa 2 (2 meses) - Seleção de componentes, ferramentas de desenvolvimento e especificação funcional do software;
- Etapa 3 (8 meses) - Prototipação, codificação do software e empacotamento mecânico.

Ano II:

- Etapa 1 (2 meses) - Produção do lote piloto;
- Etapa 2 (2 meses) - Seleção da área e implantação do lote piloto;
- Etapa 3 (2 meses) - Teste e validação da solução;
- Etapa 4 (2 meses) - Estudo de implantação de energia pré-paga.

6.2.2 Resultados das Etapas do Ano I

A seguir são apresentados os resultados das etapas do primeiro ano do projeto que já foram realizadas.

Etapa 1 - Levantamento de Dados e Descritivo Funcional do Produto

Foram realizadas reuniões de levantamento de dados e necessidades com todos os departamentos que, direta ou indiretamente, tinham contatos com o projeto desenvolvido: Engenharia de Redes, Medição, Comercial, Tecnologia de Informação e Manutenção.

O resultado obtido foi a geração de um documento denominado Descritivo Técnico do Produto, conforme Anexos, que descreverá com detalhes todas as características técnicas e funcionalidades desenvolvidas, que norteou a equipe de projetos na elaboração de solução

técnica ideal. Servirá também com balizador dos resultados obtidos ao final do projeto, podendo, entretanto, ser revisado ao longo do desenvolvimento, em função de novas necessidades que possam surgir.

Etapas 2 - Seleção de Componentes, Ferramentas de Desenvolvimento e Especificação Funcional do Software.

Foram pesquisadas as diversas tecnologias de componentes disponíveis no mercado, buscando identificar as mais adequadas para atenderem ao plano de características dos produtos, dentro dos parâmetros econômicos já estabelecidos, bem como as melhores ferramentas de desenvolvimento para minimizar o tempo de projeto.

Em paralelo, a equipe de desenvolvimento de software elaborou a especificação funcional do software, para atender ao descritivo técnico do produto. Nesta especificação foram decididos quais os algoritmos a serem implementados; as sub-rotinas, a interface homem/máquina, a estruturação dos programas e arquivos, a formatação dos dados e campos.

Como resultado obteve-se a elaboração de um documento denominado Arquitetura da Solução (conforme capítulo V), onde foram indicados todos os componentes a serem utilizados, seus custos e sua forma de interconexão e do documento de Especificação Funcional do Software, que servirá como guia para a equipe de programadores.

Etapas 3 - Prototipação, Codificação do Software e Empacotamento Mecânico

Esta etapa compreende o desenvolvimento do hardware e a codificação do software conforme descrito no tópico de Metodologia, deste documento. É uma etapa extensa na qual toda a equipe de desenvolvimento será colocada para realização do projeto dentro dos padrões já estabelecidos e aceitos pela Bandeirante, constituído por um protótipo funcional, que servirá de modelo para a montagem do lote piloto a ser implantado.

6.2.3 Resultados das Etapas do Ano II

A seguir são apresentados os resultados das etapas do segundo ano do projeto realizado.

Etapas 1 – Produção do Lote Piloto

Nesta fase o projeto se encontrava concluído para iniciar a produção de um lote piloto que, a princípio, estará apto a atender 120 unidades consumidoras.

Resultado Obtido:

- 15 Módulos Concentradores para 8 medidores;
- 15 Caixas Externas de Medição;
- 120 Módulos Displays Residenciais.

Etapa 2 - Seleção da Área e Implantação do Lote Piloto

Nesta fase pretende-se criar uma situação real de implantação, com todos os produtos desenvolvidos, para obter-se uma validação em campo da solução. Não estão previstos neste projeto os serviços de integração da Unidade Central de Comunicação com os sistemas de gestão de Faturamento, Medição, COS e Call Center. Tal desenvolvimento deverá ser objeto de oportuno trabalho, quando finalizada a validação da solução aqui apresentada.

Resultado Esperado:

Implantação do sistema para 120 unidades consumidoras

Etapa 3 - Teste e Validação da Solução

Esta etapa, apesar de extensa, não demandará grandes quantidades de recursos humanos. A equipe de desenvolvimento se limitará a corrigir problemas que venham a surgir durante a operação assistida do sistema, bem como realizar modificações nos produtos em função de sugestões do pessoal de campo.

Resultado Esperado:

Elaboração do Relatório Final de Validação.

Etapa 4 - Estudo de Implantação de Energia Pré-paga

Depois de validada a solução, os consumidores serão estimulados a optar pela modalidade de pré-pagamento em seus contratos. O resultado da aceitação desta modalidade será incluído em diversas informações que deverão nortear os passos futuros com relação a mais esta alternativa de relacionamento com o consumidor final.

Resultado Esperado:

Elaboração de relatório com relação à aceitação e facilidade de operação de sistemas de pré-pagamento de energia.

6.3 A Solução Tecnológica Desenvolvida

O sistema antifraude desenvolvido foi baseado em uma arquitetura modular que já foi apresentada na figura 5.1. A seguir, cada um dos componentes desta arquitetura são descritos com maiores detalhes.

6.3.1 Módulo Concentrador

O módulo concentrador é composto por 3 placas:

- Placa CPU;
- Placa de entrada de pulso;
- Placa para comunicação *ZigBee*.

A placa CPU que é composta de um microcontrolador da Freescale (Motorola)[58], o MC9S08GT32, com memória flash, RAM e duas seriais internas, um RTC (relógio de tempo real) com bateria tipo CR2032 com duração mínima de 5 anos. Também foi desenvolvido um barramento de extensão para interligação das placas adicionais de Entradas de Pulso, Saídas de Corte/Religamento e Comunicações. A placa possui duas entradas digitais, sendo uma para instalação tipo push-button e outra para alarme de caixa aberta tipo on/off.

A placa CPU é dotada de um circuito para comunicação wireless utilizando a tecnologia *ZigBee*. Para isto foi utilizado o circuito integrado MC13191 da Freescale Semiconductor[59], que é um transmissor/receptor (transceiver) de baixa potência que opera na banda livre de 2,4GHz dotado de 16 canais, possibilitando a comunicação ponto-a-ponto e formação de uma rede com topologia em estrela, a um uma taxa de dados de 250Kbps.

A placa de entrada de pulsos é responsável pelo acondicionamento dos sinais de entrada, suporta até 4 entradas configuráveis, no padrão DIN (2 fios) ou ABNT (4 fios). A placa CPU suporta até 2 placas de acondicionamento, perfazendo um total de 8 entradas pulsadas.

O módulo concentrador irá monitorar também a abertura da caixa de medição disponibilizando esta informação para o centro de medição da concessionária, buscando coibir a ocorrência de fraudes no sistema. O concentrador é o responsável pelo armazenamento e totalização das informações de energia consumida, enviadas por até 8 medidores de energia eletrônicos ou eletromecânicos com saídas pulsadas no padrão ABNT e/ou DIN, a ele associados. As informações armazenadas poderão ser transmitidas, por tecnologia *ZigBee*, a um coletor de dados portátil convencional, que será utilizado pelos leituristas de rua. Adicionalmente, as informações também poderão ser transmitidas por *ZigBee* de um módulo concentrador para outro formando uma rede *ZigBee* até uma unidade central que se comunique com a concessionária via modem, agrupando os dados de uma célula de medição de uma determinada região. As informações de consumo totalizado em kWh serão enviadas também por *ZigBee* ao módulo display residencial, instalado em qualquer ponto de alimentação das residências atendidas pelo sistema. Haverá a possibilidade, também, de serem

enviadas informações de consumo em Reais (R\$) no período, caso seja autorizado pela área comercial da empresa. Neste esquema, cada concentrador se comunica com até oito módulos displays, cada um com um endereço de rede próprio que será associado via software a uma determinada entrada de medição.

A informação de consumo em kWh integralizada no período de faturamento proverá o consumidor de uma importante ferramenta de planejamento de suas despesas, pois o mesmo informará, em tempo real, os valores de energia consumida, evitando as desagradáveis surpresas quando da chegada da fatura de energia.

Este módulo também permitirá à concessionária a criação de novas formas de tarifação junto ao consumidor, com o objetivo de ampliar a gama de alternativas para adequar o perfil de cada consumidor aos serviços prestados. As funções a serem implementadas adicionalmente no módulo concentrador serão as seguintes:

- Corte e religamento remoto de energia;
- Tarifa amarela;
- Levantamento de curva de carga do consumidor;
- Implementação de programa de GLD (Gerenciamento pelo Lado da Demanda);
- Monitoração de violação de caixa de medição (controle de fraude);
- Totalização de energia consumida no período (fechamento da fatura);
- Totalização contínua da energia consumida;
- Gerenciamento da comunicação com os diversos módulos displays residenciais a ele associados, módulo concentrador secundário ou da concessionária e coletor de dados;
- Implementação de programa de energia pré-paga (funcionalidade futura já prevista).

Vale ressaltar que algumas funções aqui previstas deverão ser objeto de autorização por parte dos órgãos reguladores competentes. Entre elas destacamos os programas de GLD, tarifa amarela e energia pré-paga.

Também, sua real implementação prescindirá do desenvolvimento de sistemas de gerenciamento, que farão o controle de forma hierarquizada das informações, enviando tais dados aos subsistemas de hierarquia inferior (módulos concentradores secundários ou concessionárias) que, por sua vez, fará o controle local das informações de consumo, período de consumo e crédito de energia.

Esta topologia, ainda em fase preliminar de estudos, minimizará em muito o tráfego de

informações entre os diversos dispositivos, fator fundamental para o aumento de confiabilidade do sistema e de viabilidade econômica da solução.

Figura 6.1 – Fotos do módulo concentrador

6.3.2 Módulo de Corte/Religamento

Este módulo é alimentado em 5 Vdc sendo composto de saídas digitais opto-acopladas, que comandam a operação de 8 relés de potência que são ligados em série com os circuitos de cada um dos consumidores monitorados. Este módulo recebe os comandos do módulo concentrador via porta serial RS485 para executar operação de corte e religamento.

O módulo de corte/religamento foi construído separado do módulo concentrador com o objetivo de facilitar a manutenção e isolar a parte de potência da parte de medição. É importante observar que os relés de potência utilizados têm capacidade de comutação de até 100A e suas bobinas operam conforme pulsos de energização e desenergização, e, desta forma, mesmo que falte alimentação no sistema o relê mantém o último estado de comutação.

Figura 6.2 – Fotos do módulo de corte e religamento

6.3.3 Fonte de Alimentação

Este módulo é composto de uma fonte, com entrada de 127 Vac, saída chaveada de 5 Vcc/1A e saída chaveada de 24 Vcc/1A, responsável pela alimentação dos módulos concentrador e corte/religamento.

6.3.4 Módulo Display

O módulo display é composto de um microcontrolador MC9S08GT32 da Freescale (Motorola)[58] e um display de 2 linhas com 16 caracteres cada, que controlará a comunicação com o módulo concentrador via *ZigBee*. O módulo display possui um botão de acionamento que quando pressionado liga o mesmo à rede elétrica. Desta forma, quando o display não estiver sendo utilizado, o equipamento será mantido desligado e desconectado da rede elétrica, provendo desta forma uma maior proteção a descargas elétricas, maior vida útil e baixo consumo de energia. Ao acionar o botão, o display será ativado, enviando seu código identificador (ID), único para cada módulo produzido, e que aguardará uma comunicação do módulo concentrador com os dados de consumo de energia, relativos ao identificador em questão.

O módulo display, a ser instalado na residência dos consumidores atendidos pelo sistema poderá ser conectado em qualquer ponto de alimentação, comunicando-se com o módulo concentrador através da tecnologia *ZigBee*, fornecendo um conjunto de informações, que será a interface homem / máquina do sistema junto ao consumidor.

O módulo display proverá as seguintes informações:

- Energia total consumida em kWh;
- Energia consumida no período em kWh;
- Crédito de energia em kWh (para programa futuro de energia pré-paga);
- Crédito de energia em Reais (R\$) (para programa futuro de energia pré-paga);
- Alarme de fim de crédito (para programa futuro de energia pré-paga).

Em função do programa específico de tarifação a ser implementado no consumidor, a informação fornecida deverá variar. Esta definição poderá ser mais bem definida conforme solicitação da concessionária, seguindo o que for permitido pelas futuras normas de regulamentação.

Figura 6.3 – Fotos do módulo display

6.4 Resultados Obtidos

No momento de conclusão desta dissertação o *P&D* da Bandeirante Energia continua sendo desenvolvido e desta forma não estão disponíveis resultados de operação do sistema piloto. Apesar deste fato, as tecnologias desenvolvidas já foram validadas em laboratório da empresa citada e alguns resultados importantes já estão disponíveis:

- A tecnologia de comunicação *ZigBee* utilizada se destacou quanto a sua performance, custo reduzido e facilidade de utilização. Isto é um indicativo de que esta tecnologia deve ser expandida no futuro, permitindo superar um dos grandes obstáculos da automação da medição de energia elétrica e a disponibilidade de canais de comunicação com custo reduzido de operação.
- Os equipamentos desenvolvidos estão baseados em microcontroladores e tecnologias de custo reduzido, desta forma o custo de equipamentos por consumidor para o sistema antifraude desenvolvido é muito atrativo comparado com as outras tecnologias similares, este fato, aliado ao reaproveitamento de medidor eletromecânico existente ou eletrônico, é decisivo para que este tipo de solução seja aplicado em grande escala, inicialmente em regiões com grandes problemas de fraude e furto de energia e no futuro em grandes consumidores que optem pelo sistema de tarifação diferenciada.

Os equipamentos desenvolvidos tiveram um desempenho satisfatório em condições de laboratório, sendo esperado um desempenho equivalente em campo. A figura 6.4 ilustra uma idéia da expansão do sistema para o futuro.

Figura 6.4 – Idéia de expansão do sistema para futuro

CAPÍTULO 7 - Conclusões e Sugestões

7.1 Conclusões

Espera-se que a realização do presente trabalho tenha sido de grande valia para o leitor, pois para sua realização foi feita uma vasta pesquisa bibliográfica e também efetivado o contato, através de entrevistas formais e informais, com gerentes de desenvolvimento de projeto de diversas empresas de engenharia e também com o pessoal técnico de diversas concessionárias, distribuidoras de energia elétrica. O grande volume de informações coletadas, que foi compilado e apresentado nos capítulos desta dissertação, dá uma base sobre os principais sistemas de automação da medição de energia elétrica e mostra sucintamente uma parte das tecnologias de hardware, software e sistemas de comunicação que estão disponíveis para a área de automação como um todo e mais especificamente para a automação da medição. No presente capítulo foram analisados os casos mais representativos relacionados com a medição de energia e a sua automação, dentro de uma metodologia que permitiu avaliar quais das tecnologias disponíveis poderiam ser aplicadas a cada caso, indicando algumas características técnicas mais gerais dos equipamentos a serem desenvolvidos e estimando os custos deste desenvolvimento em nível de projetos de hardware e de software. Com base nos custos de projeto e de materiais, um esboço de preços de mercado para os equipamentos pode ser estimado dentro de uma visão preliminar do mercado de automação da medição. Para complementar o trabalho, foi realizada uma análise geral do mercado para cada tipo de aplicação inicialmente descrita, porém dentro de um enfoque um pouco mais global. Dentro de todo este contexto algumas conclusões emergem naturalmente, sendo que algumas delas já foram esboçadas dentro dos capítulos e outras serão agora formuladas. Estas conclusões podem ser divididas em dois grandes itens, considerando-se os aspectos técnicos e econômicos, relacionados com os sistemas de automação da medição de energia elétrica. A seguir as conclusões relacionadas com cada um destes aspectos serão apresentadas.

7.1.1 Conclusões de Ordem Técnica

Considerando-se os aspectos de ordem técnica dos sistemas de automação descritos nesta dissertação, as seguintes conclusões podem ser observadas:

As tecnologias de processamento digital de sinais atualmente disponíveis são bastante vastas e os casos que aqui foram abordados, se bem que representativos, são apenas uma parcela muito pequena do que está disponível hoje no mercado, em termos de circuitos microprocessados e placas de processamento.

As tecnologias hoje disponíveis já são capazes de resolver completamente o problema técnico da construção de equipamentos de automação da medição, seja através de novos medidores eletrônicos, seja através de circuitos eletrônicos acoplados a medidores eletromecânicos.

O grande problema tecnológico atual está ligado à comunicação dos sistemas de automação com um sistema de coleta de dados central. Nesta área as tecnologias de comunicações tradicionais que já estão bem consagradas dependem normalmente de linhas privadas ou canais de comunicação dedicados e, portanto tem custo operacional excessivo para aplicação na automação da medição de energia. As tecnologias *ZigBee* e *X-10* que foram citadas neste trabalho têm um grande potencial para a criação de uma rede de comunicação de custo reduzido que interligue um grande numero de consumidores a um concentrador de comunicação, que por sua vez é ligado à concessionária por meio de um canal privado pelo qual transitam as informações de centenas ou mesmo milhares de medidores (de forma que o custo do concentrador e de sua comunicação fica bastante diluído). Entretanto, estas duas tecnologias se encontram hoje em um nível bem embrionário (em termos de aplicação na automação de medição), sendo basicamente objetivo de projetos de pesquisa no qual estão sendo implementadas apenas redes muito pequenas e que não são ainda representativas aos sistemas pretendidos.

7.1.2 Conclusões de Ordem Econômica

Considerando-se os aspectos de ordem econômica dos sistemas de automação descritos nesta dissertação, as seguintes conclusões podem ser observadas:

O grande obstáculo atual para a implantação efetiva de sistemas de automação da medição não tem caráter técnico, mas sim econômico.

Os medidores eletromecânicos apresentam um custo reduzido e uma longa vida útil, o que torna difícil que qualquer tecnologia de medidor digital venha a substituí-los com vantagens em um curto espaço de tempo. No futuro, podem surgir no mercado medidores eletrônicos importados de custo reduzido (de origem chinesa ou coreana), mas mesmo assim, para poderem competir com os medidores eletromecânicos o custo dos mesmos deverá ser muito baixo a fim de compensar uma durabilidade que certamente será menor do que a

apresentada pelos medidores tradicionais. Uma opção de custo reduzido e alta durabilidade talvez possa ser obtida com uma tecnologia mista (usando circuitos eletrônicos simples e totalizadores mecânicos) que tem o potencial de ser muito robusta e também de custo acessível.

A idéia apresentada de reaproveitamento do medidor existente para compor sistemas de automação é realmente muito interessante. Este é um nicho que poderá ser bem explorado pelas empresas nacionais, pois a tendência dos equipamentos importados é compor uma solução mais integrada na qual o medidor existente não é reaproveitado. Este tipo de solução, com o reaproveitamento do medidor existente, dificilmente seria adotada por técnicos europeus ou dos EUA, pois lá a tendência é sempre de fazer uma renovação total, enquanto aqui no Brasil, devido à crônica limitação de recursos, os técnicos já estão mais acostumados com solução de “retrofitting”.

Os sistemas antifraude tornam-se economicamente viáveis quando um único equipamento for capaz de ler quatro ou mais medidores. Atualmente estes sistemas teriam um apelo de aplicação maior somente nas regiões em que o nível de perdas comerciais seja extremamente elevado. Desta forma o mercado para este tipo de sistema ainda deve ser por um bom tempo bastante restrito, mas a tendência é que uma maior expansão seja observada com base nos resultados obtidos pela implantação dos primeiros sistemas.

O sistema de medição com tarifa diferenciada deve obrigatoriamente passar para uma fase de implantação maciça nos próximos anos. Assim o desenvolvimento de um sistema nacional de custo reduzido (reaproveitando o medidor existente) que implemente o sistema de tarifa amarela tende a ser um bom investimento.

A aplicabilidade prática dos sistemas pré-pagos no Brasil é bastante restrita, tanto devido a fatores econômicos como sócios culturais. Mas com um trabalho de incentivo e mudanças culturais, a médio prazo pode se transformar em realidade.

Os primeiros sistemas efetivos de automação da medição a serem implantados em maior escala (principalmente sistemas antifraude e tarifa amarela), deverão operar com base em comunicação por meio de coletores de dados manuais (utilizando RF ou infravermelho). As tecnologias *ZigBee* e *X-10* têm um bom potencial, mas deverão ser mais amadurecidas através de testes, antes de uma aplicação prática em um sistema real. Desta forma a questão da comunicação com custo reduzido em sistemas de automação da medição deve ser ainda um dos pontos tecnológicos que vai ficar em aberto nos próximos anos, sendo um campo de pesquisa promissor para soluções inovadoras.

No desenvolvimento do trabalho, o autor pôde observar como os custos de projetos e desenvolvimento são importantes e afetam de forma significativa o preço de mercado do produto desenvolvido. Foi observado claramente nos casos estudados que muitas vezes não é a tecnologia final mais acessível a mais adequada, principalmente se o esforço de desenvolvimento com esta tecnologia for muito grande e o mercado incipiente. Para partes dos sistemas que têm uma baixa demanda (por exemplo, os concentradores de comunicação) muitas vezes vale mais a pena utilizar um hardware pronto, mesmo que ele tenha um custo maior do que o de uma solução customizada (com custo reduzido de componentes), mas com alto custo de desenvolvimento.

A metodologia simplificada de determinação de custos finais e que considera uma amortização fixa do desenvolvimento (em um tempo de amortização variável), são muito mais fáceis de aplicar, pois não levam em conta nem os custos de desenvolvimento e nem o mercado potencial, mas seus resultados podem ser enganosos levando a preços de mercado baixos no qual se espera certa margem de lucros, mas que na realidade podem não cobrir os custos de desenvolvimento levando a uma condição prática de prejuízo.

Como resultado do presente trabalho o autor recomenda que dentro da área automação da medição de energia de sejam priorizados os seguintes temas:

- Sistemas antifraude baseados nos medidores eletromecânicos com leitura simultânea de quatro ou mais medidores e comunicação com coletor de dados;
- Medidor com tarifa amarela, que possa ser integrado ao medidor existente e comunicação com coletor de dados;
- Sistemas de comunicação com baixos custos de operação que possam ser aplicados à automação da medição;
- Medidores mistos com tecnologia mecânica e eletrônica de custo acessível;

As empresas do setor elétrico e o autor recomendam que sejam agilizados os procedimentos legislativos e técnicos para a implantação da tarifa amarela, como forma de minimizar o consumo no horário de pico, de forma a dar uma maior margem de operação enquanto as expansões do sistema elétrico estão sendo efetivadas.

7.2 Sugestões para Trabalhos Futuros

Um ponto importante que ainda é bastante incipiente dentro dos temas tratados neste trabalho é o uso de tecnologias de comunicação wireless (principalmente a tecnologia *ZigBee*) para implementação de redes de comunicação com baixo custo de operação, a fim de atender

às demandas de comunicação dos sistemas de automação da medição de consumo de energia elétrica. Vários aspectos sobre a operação destas redes, incluindo as questões de segurança, confiabilidade, imunidade a ruídos, performance e taxas de transmissão obtidas, deverão ser acompanhadas e testadas com maior profundidade de preferência, também, com base em casos reais, a fim de demonstrar as reais potencialidades e limitações deste tipo de rede.

Sendo assim, os futuros trabalhos poderão utilizar os resultados finais deste trabalho, após a implantação do lote piloto e expandi-lo para outras áreas, por exemplo, para as áreas industrial e predial, pois desde há muito tempo essas áreas só não foram totalmente automatizadas, devido aos grandes problemas enfrentados com a passagem de cabos por locais de difícil acesso e custos com este tipo de serviços. Já com o amadurecimento da tecnologia *ZigBee* (wireless), estes problemas praticamente deixarão de existir, abrindo um vasto campo para as aplicações de sistemas nestas áreas.

Outro ponto importante que deve ser levado em consideração para os trabalhos futuros, será o custo gasto para cada consumidor, visto que no presente trabalho obteve-se o valor de R\$ 2.400,00 para o módulo concentrador (protótipo) com os seus respectivos conjuntos de oito módulos displays, desta forma, o custo por consumidor saiu em R\$ 350,00. Entretanto, espera-se que num futuro breve, com o desenvolvimento de novos componentes, este valor seja reduzido, viabilizando economicamente cada vez mais a implementação desta idéia.

REFERÊNCIAS

- [1] FERREIRA, A. B. H. **Mini Aurélio Século XXI Escolar**. 4th ed. São Paulo: Nova Fronteira, 2000. 77p.
- [2] QUEIROZ, H.L. **Metodologia para definição de agrupamento de consumidores e os requisitos de qualidade do fornecimento**. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, 15., São Paulo, 2002.
- [3] CIPOLI, J.A.; FERREIRA, B.E.M.; PASQUA, L.P.; MORAES, M. **Padrão compacto de entrada de energia elétrica**. In: CONGRESSO DE INOVAÇÃO TECNOLÓGICA EM ENERGIA ELÉTRICA, 2., São Paulo, 2003.
- [4] FILHO, S. de M. **Medição de energia elétrica**. 4th ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1997.
- [5] BIZARRIA, J. W. P. **Sistema automatizado para aquisição de dados de consumo de energia elétrica, água e gás**. 2000. 130p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.
- [6] BRUGGER, R. **Estado actual de tecnologia prepago de electricidad en Argentina**. In: CONFERÊNCIA CLER, 2001, São José, Costa Rica.
- [7] AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução N.º 56**. Brasília, 03 de março de 1997.
- [8] CHUEIRI, I. J. **Sistema automático de controle de iluminação pública com comandos via pager**. Curitiba, PR: LAC-UFPR/COPEL, 1997. (Relatório, 2817/97).
- [9] AES ELETROPAULO. **Combate a fraudes e ao furto de energia**. In: ENCONTRO TÉCNICO DE REDES SUBTERRÂNEAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, 2., Light, Rio de Janeiro, 2004.
- [10] AGENCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Audiência pública 010/2003 - Nota técnica 047/2003/SRE/ANEEL**, Brasília, 2003.

- [11] ACHÃO, C. C. L. **Análise da estrutura de consumo de energia pelo setor residencial brasileiro**. 2003. 127p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2003.
- [12] COMPANHIA PAULISTA DE FORÇA E LUZ. **Documento GED 5788 – Padrão de entrada instalado no alto do poste com leitura através de lente**. Campinas, São Paulo, 2006.
- [13] PROCOMP INDÚSTRIA ELETRÔNICA. **Guia do usuário do gerenciador SMT**. São Paulo, 2003.
- [14] GARCIA, D. A. A. **Desenvolvimento de medidor eletrônico de energia elétrica de custo competitivo associado a estudos sobre medições de energia elétrica**. 2000. 132p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.
- [15] PROCOMP INDÚSTRIA ELETRÔNICA. **Manual de medidores eletrônicos SmarMeter – SMT 1510**, São Paulo, 2003.
- [16] MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Energia elétrica para todos os brasileiros até 2008**. Nota à Imprensa. 2003. Disponível em : <<http://www.mme.gov.br/noticias.asp>>. Acesso em: nov 2003.
- [17] **GIORGIO, RINALDO DI**, Smart cards: a prime. **Java World. Feb. 2006**. Disponível em: <<http://www.javaworld.com/javaworld/jw-12-1997/jw-12-javadev.html>>. Acesso em: 25 fev. 2006.
- [18] UNITECH. **Portable data collection terminal – P-500**. Manual de coletores, São Paulo, 2005.
- [19] COBRAC 2004. **Aplicações com palmtop**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CADASTRO TÉCNICO MULTIFINALITÁRIO. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.
- [20] RITCHIE, W. K.; STERN, J. R. **Telecommunications local networks**. London: Chapman & Hall, 1993. v. 1.
- [21] FEHER, K. **Wireless digital communications: modulation and spread spectrum applications**. N.J.: Upper Saddle River, Prentice-Hall PTR, 1995.

- [22] MARQUES, G. A. G. **Transmissão de dados via rede elétrica**, monografia submetida à UFSC como requisito para a aprovação da disciplina DAS-5511. Disponível em: <http://www.wirelessbrasil.org/wirelessbr/colaboradores//gabriel_marques/dados_via_rede_01.html>. Acesso em: 06 fev. 2006.
- [23] ROZAS, N. **Implantação de sistemas de leitura automática de medidores de insumos prediais**. 2002. 138 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.
- [24] NETO, E. F. **Metodologia e evolução de cálculo e cobrança no combate à fraude e furto de energia**. In: CIERTEC - SEMINÁRIO INTERNACIONAL SOBRE GESTÃO DE PERDAS, EFICIENCIA ENERGÉTICA E PROTEÇÃO DA RECEITA NO SETOR ELÉTRICO. 5., 2005. Trabalho BR-13, Tema 12. Maceió, 2005.
- [25] DELMANTO, C.; DELMANTO, R.; JÚNIOR, R. D. **Código Penal Comentado**. 4th ed. São Paulo: Editora Renovar, 1998. 550 p.
- [26] TAPAI, G. M. B.(Coord). **Artigo 205 – Código Civil**. São Paulo: Editora Revista dos Tribunais, 2004. 1354 p.
- [27] AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Condições gerais de fornecimento de energia**. Resolução N.º 456 de 29 de novembro de 2000 e Resolução N.º 090 de 27 de março de 2001. Brasília, 2001
- [28] GOMES, L. F. **Código penal, código de processo penal e constituição federal**. 7th ed. São Paulo: Editora Revista dos Tribunais, 2005. 1238 p.
- [29] AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA **Horosazonal**. Artigo N.º 65 e N.º 66 da Resolução N.º 090 de 27 de março de 2001. Brasília, 2001.
- [30] COMPANHIA DE ELATRICIDADE DO CEARÁ. **Projeto tarifa amarela**. 2004. Disponível em: www.sfie.org.br/palestras/energia/coelce_projeto_tarifa_amarela240902.htm - 4k. Acesso em: 20 mai. 2006.
- [31] CAMARGO, A. C. X. de. **O sistema pré-pago de utilização da água e outros métodos eletrônicos de controle de uso da água**. Jus Navigandi, Teresina, ano 9, n. 623, 23 mar. 2005. Disponível em: <<http://jus2.uol.com.br/doutrina/texto.asp?id=6505>>. Acesso em: 24 jun. 2006.

- [32] REVISTA METERING INTERNACIONAL **Metering system**. p. 28. ISSUE 4, jun. 2000. Disponível em: < http://www.metering.com/archive/c_034.php > . Acesso em: 25 jun. 2006.
- [33] NASCIMENTO, J. C. de; BANNACK, A. **Sistema eletrônico de medição de energia com pré-pagamento utilizando smart card**. mar. 2006. Disponível em: <http://www.lactec.org.br/OInstituto/downloads/Biblioteca/2002/030_2002.pdf>. Acesso em: 20 mar. 2006.
- [34] REVISTA METERING INTERNACIONAL. **Metering system**. p. 33. ISSUE 4, jun. 2000. Disponível em: < http://www.metering.com/archive/c_004.htm > . Acesso em: 22 mai. 2006.
- [35] ONGARO, V. **Copel faz teste com energia pré-paga**. Jornal O Estado do Paraná. Curitiba, jan. 2001.
- [36] MENDES, M. H. et al. **Simulação e análise probabilística de risco, um estudo de caso em GLD: projeto Light de Deslocamento da Demanda na Ponta**. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, 15., Foz de Iguaçu: Trabalho T-18 17. Foz de Iguaçu, 1999.
- [37] T&T Company do Brasil. Disponível em: <<http://www.ttcompany.com.br/stc.html>>. Acesso em 27 jun 2006.
- [38] CEPEL. Rio de Janeiro. **Sistema de telecomando centralizado**. Disponível em: <<http://inventabrasilnet.t5.com.br/stlcc.htm>>. Acessado em: 27 mar. 2006.
- [39] FILHO, S. de M. **Medição de energia elétrica**. 4th ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1997.
- [40] PROCOMP INDÚSTRIA ELETRONICA. **Manual de medidores eletrônicos SmarMeter – SMT 1510**. São Paulo, 2003.
- [41] KRON INSTRUMENTOS ELÉTRICOS. **Manual do usuário KRON Medidores**. São Paulo, 2006.
- [42] ZIGBEE ALLIANCE. **Base de Dados ZigBee**. 2004. Disponível em: <<http://www.ZigBee.org/>>. Acesso em: mai. 2004.

- [43] BLUETOOTH SPECIAL INTEREST GROUP. **Base de Dados Bluetooth**. Disponível em: <<http://www.bluetooth.com/>>. Acesso em: jan. 2004.
- [44] FELIX, L. E. M. **Predição da indisponibilidade por chuvas em redes VSAT no Brasil**. Dissertação (Mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.
- [45] FONSECA JÚNIOR, B. J. B. **Análise do uso da alocação dinâmica de canais em sistemas de telefonia celular**. 1999. 120 p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.
- [46] CAETANO, R. E. **Análise da confiabilidade e manutenibilidade de topologias do sistema de telefonia fixa**. 2000. 137 p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.
- [47] SENGER, E. C. **Sistema de comunicação carrier para redes de distribuição**. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, 13., 1997. São Paulo: CESP/ELETROPAULO. São Paulo, 1997.
- [48] MARQUES, G. A. G. **Transmissão de dados via rede elétrica**. Disponível em: <http://www.wirelessbrasil.org/wirelessbr/colaboradores/gabriel_marques/dados_via_rede_11.html>. Acesso em: 05 mai. 2005.
- [49] AURESIDE – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE AUTOMAÇÃO RESIDENCIAL. **Protocolo X-10**. 2006. Disponível em: <<http://www.aureside.org.br/temastec/default.asp?file=protocolos.asp>>. Acesso em: 25 mai. 2006.
- [50] PINHEIRO, J. M. S. **Multiplexação ortogonal por divisão de frequência**. Disponível em: <http://www.projetoederedes.com.br/artigos/artigo_multiplexacao_ortogonal_por_divisao_de_frequencia.php>. Acesso em: 24 jun. 2006.
- [51] JESZENSKY, P. J. E. **Introdução à técnica de comunicação por espalhamento espectral (spread spectrum)**. In: SIMPOSIO BRASILEIRO DE TELECOMUNICAÇÕES. 9., 1991. São Paulo: Minicurso B. São Paulo, 1991.
- [52] TEZA, V. R. **Alguns aspectos sobre a automação residencial - Domótica**. 2002. 112 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2002.

- [53] PEREIRA, G. A. **Sistema experimental de monitoramento e controle para casas de vegetação baseado em redes de controle distribuído LonWorks**. 2006. 126 p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.
- [54] LON WORKS. PLT-22. 1999. **Power line transceiver user's guide**. Disponível em: <<http://www.echelon.com>>. Acesso em: 05 jun. 2003.
- [55] ARAUJO, A. F. R.; VITTORI, K. **Algoritmo de roteamento adaptativo para o balanceamento de carga em redes de telecomunicações**. Sba Controle & Automação. São Paulo, vol.13, n. 3, p. 248-265. ISSN 0103-1759, set. 2002.
- [56] PLUG-INTM TECHNOLOGY. **Manual PLUG-IN Intelogis**. PLUG 1998.
- [57] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMA E TÉCNICAS. NBR-5434. **Redes de distribuição aérea urbana de energia elétrica**.1982.
- [58] FREESCALE SEMICONDUCTORS. **MC9S08GT32 Datasheet**. Disponível em : <<http://www.freescale.com>>. Acesso em: 10 abr. 2005.
- [59] FREESCALE SEMICONDUCTORS. **MC13191 Datasheet**. Disponível em: <<http://www.freescale.com>>. Acesso em: 20 jun. 2005.
- [60] ALMEIDA, M. P. C. de. **Modelamento de efeitos de propagação em enlaces satélite de baixa órbita**. 2003. 122 p. Tese (Doutorado) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2003.
- [61] TELECO – INFORMAÇÕES EM TELECOMUNICAÇÕES. **Seção: tutoriais em telefonia celular**. 2006. Disponível em <http://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialgprs/pagina_6.asp> . Acesso em: 07 de julho de 2006.
- [62] PINHEIRO, J.M.S. **Projeto de Redes**. Disponível em: <http://www.projetoderedes.com.br/artigos/artigo_zigbee.php>. Acesso em: 20 fev. 2006.
- [63] GRUPO EDP – BANDEIRANTE. **Norma setorial técnica - Rede de Distribuição Urbana - 15kV – N8.01.01**. São Paulo, 2004.