UNESP – UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
FACULDADE DE ENGENHARIA DE BAURU
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

HAROLDO LUIZ MORETTI DO AMARAL

DESENVOLVIMENTO DE UM SMART METER: um estudo sobre eficiência energética através das redes inteligentes

BAURU
2014

HAROLDO LUIZ MORETTI DO AMARAL

DESENVOLVIMENTO DE UM SMART METER: um estudo sobre eficiência energética através das redes inteligentes

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, da Faculdade de Engenharia de Bauru, da Universidade Estadual Paulista.

Orientador: Prof. Dr. André Nunes de Souza

BAURU

2014

Amaral, Haroldo Luiz Moretti do.
Desenvolvimento de um smart meter : um estudo sobre a eficiência energética através das redes inteligentes / Haroldo Luiz Moretti do Amaral, 2014.
88 f. : il.

Orientador: André Nunes de Souza

Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia, Bauru, 2014

1. Smart meter. 2. Smart grid. 3. Eficiência energética. I – Título. II – Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
CAMPUS DE BAURU
FACULDADE DE ENGENHARIA DE BAURU

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE HAROLDO LUIZ MORETTI DO AMARAL, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA, DO(A) FACULDADE DE ENGENHARIA DE BAURU.

Ao 01 dia do mês de dezembro do ano de 2014, às 09:00 horas, no(a) Sala de reuniões da Seção Técnica de Pós-graduação, da Faculdade de Engenharia de Bauru, reuniu-se a Comissão Examinadora da Defesa Pública, composta pelos seguintes membros: Prof. Dr. ANDRE NUNES DE SOUZA do(a) Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Bauru, Prof. Dr. OSCAR ARMANDO MALDONADO ASTORGA do(a) Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Guaratingueta, Prof. Dr. PAULO SERGIO DA SILVA do(a) Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Bauru, sob a presidência do primeiro, a fim de proceder a arguição pública da DISSERTAÇÃO DE MESTRADO de HAROLDO LUIZ MORETTI DO AMARAL, intitulado "DESENVOLVIMENTO DE UM SMART METER: UM ESTUDO SOBRE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA ATRAVÉS DAS REDES INTELIGENTES". Após a exposição, o discente foi arguido oralmente pelos membros da Comissão Examinadora, tendo recebido o conceito final: APROVADO . Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que, após lida e aprovada, foi assinada pelos membros da Comissão Examinadora.

Prof. Dr. ANDRE NUNES DE SOUZA

Prof. Dr. OSCAR ARMANDO MALDONADO ASTORGA

Prof. Dr. PAULO SERGIO DA SILVA

Dedico este trabalho com todo carinho
aos meus pais que me incentivaram e que me
deram total apoio para a concretização
de mais essa etapa em minha vida.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus pela saúde, força e perseverança durante esta caminhada.

Agradeço ao Prof. Dr. André Nunes de Souza pela orientação, incentivo e amizade durante esses anos e principalmente pelo convite para participar do grupo de pesquisas LSISPOTI enquanto ainda estava completando minha graduação. Este convite abriu grandes portas para meu desenvolvimento, serei sempre grato. Aproveito para agradecer a Prof. Dra. Maria Goretti Zago, minha orientadora durante a graduação e que até hoje nos incentiva a continuar lutando e buscando nossos objetivos.

Agradeço a Prof. Dra. Zita Vale, ao Prof. Dr. Carlos Ramos e aos pesquisadores Filipe Fernandes e Pedro Faria, que nos acolheram tão bem no Instituto Politécnico do Porto, abrindo suas portas para estreitarmos laços de amizade e conhecimento, através do projeto ELECON. Agradeço também ao amigo Me. Danilo S. Gastaldello pelo companheirismo e auxílio durante o dia-a-dia no laboratório. Ao Prof. Dr. Pedro da Costa Junior pela amizade e aprendizado durante o estágio docente e também pelos comentários construtivos durante a etapa de qualificação, juntamente com o Prof. Dr. Paulo Sérgio da Silva. Agradeço também aos meus amigos, sempre presentes nos momentos importantes de minha vida.

Agradeço a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo incentivo e apoio financeiro dado à execução deste trabalho e também a Texas Instruments pelo fornecimento de amostras necessárias ao desenvolvimento.

Por fim, agradeço imensamente aos meus pais, Haroldo Padovan do Amaral e Cleide Moretti, por sempre me ampararem, apoiarem e incentivarem durante todos os meus estudos. Esta conquista é de vocês também!

"O maior inimigo do conhecimento não é ignorância,

mas a ilusão do conhecimento."

Stephen Hawking

RESUMO

As *smart grids* e os *smart meters*, ou redes inteligentes e medidores inteligentes, respectivamente, tornam-se uma realidade cada vez mais próxima dos consumidores residenciais mundo afora. Diversos países vêm desenvolvendo estudos com foco nos impactos relacionados à introdução destas novas tecnologias, e a eficiência energética é um dos grandes objetivos a serem alcançados. Os ganhos relacionados à eficiência energética poderão ser percebidos diretamente pelo consumidor através da economia nas contas de energia elétrica. Também serão observados pelas concessionárias através da minimização das perdas de transmissão e distribuição, pelo aumento na estabilidade do sistema, na minimização do carregamento durante os horários de pico, entre outros. Para demonstrar o potencial de eficiência energética serão apresentadas duas referências, uma focando em medidores inteligentes e suas interfaces com os usuários, e a outra relacionando as smart grids a novos conceitos como o *demand response*. Os *smart meters* são a base para implantação das smart grids, além de serem indispensáveis na realização de testes como os apresentados. Existem no mercado diversos modelos de medidores eletrônicos disponíveis bem como kits didáticos para desenvolvimento, entretanto, dependendo da aplicação podem se tornar limitados ou inflexíveis quanto a modificações. Assim é apresentado o desenvolvimento de um *smart meter* de baixo custo com estrutura flexível, tendo como objetivo obter precisão e exatidão nas medidas além da capacidade de armazenar os dados coletados, possibilitando análises posteriores. O *smart meter* desenvolvido alcançou seus objetivos, mostrando-se uma ferramenta bastante interessante para o monitoramento da rede e também do comportamento dos consumidores.

Palavras-chave: Smart Meter, Medidor Inteligente, Sistemas Embarcados, Smart Grid, Rede inteligente, Eficiência Energética.

ABSTRACT

The smart grids and smart meters become a reality closer to residential consumers worldwide. Several countries are developing studies with focus on impacts related to the introduction of these new technologies and energy efficiency is one of the major objectives to be achieved. Gains related to energy efficiency will be felt directly by the consumer through the economy in electricity bills. Will also be noted by the concessionaires by minimizing transmission and distribution losses, by the increased system stability, minimizing the load during peak hours, among others. To demonstrate the potential of energy efficiency will be presented two references, one focusing on the introduction of smart meters and their interfaces with users and other relating the smart grids and new concepts such as demand response. The smart meters are the basis for the implementation of the smart grids, and are indispensable to conducting tests as presented. There are many electronic meters as well as educational kits for development available in the market, however, depending on the application may become limited or inflexible regarding to modifications. Finally it is presented the development of a low cost smart meter, with a flexible structure, aiming to achieve accuracy and precision in the measurements plus the ability to store the collected data, allowing further analysis. The smart meter developed achieved its objectives and proved to be a very interesting tool to monitor the network and also the behavior of consumers.

Keywords: Smart Meter, Smart Grid, Energy Efficiency, Embedded Systems.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Timeline dos estudos – Web of Science 20

Figura 2 – Smart Grid 23

Figura 3 – Esquema de uma micro unidade residencial 23

Figura 4 – Medidores Eletromecânicos 24

Figura 5 – Medidores Eletrônicos 26

Figura 6 – Simples interface com o usuário 27

Figura 7 – Interfaces com o usuário 28

Figura 8 – Modelo de medidor eletrônico para energia pré-paga 31

Figura 9 – Resultados da Pesquisa 34

Figura 10 – Informações mais importantes 35

Figura 11 – Smart grid no mundo 36

Figura 12 – Estrutura geral do sistema desenvolvido para o projeto 38

Figura 13 – Redução de consumo 39

Figura 14 – Laboratório interno com a plataforma de testes 40

Figura 15 – Sala de controle e terraço do prédio 40

Figura 16 – Sistema renovável instalado no laboratório LASIE 41

Figura 17 – Resultado do controle durante um intervalo de 12 horas 41

Figura 18 – À esquerda, diagrama geral do sistema, à direita, esquema do circuito de controle 43

Figura 19 – Principais componentes do sistema embarcado 48

Figura 20 – Fluxograma dos códigos embarcados 48

Figura 21 – Filtro de média móvel 50

Figura 22 – “Main Board” com o MSP430F2013 (amarelo), MSP430G2955 (azul) e memória flash (branco) 51

Figura 23 – Comparação entre os LCD's 52

Figura 24 – Teste do filtro passa banda IIR 58

Figura 25 – Triângulo de potência 59

Figura 26 – Tetraedro de potência 60

Figura 27 – Distorção na saída do transformador abaixador testado 63

Figura 28 – "Analog Board", Resistores Shunt (amarelo) e Divisor Resistivo (azul) .65

Figura 29 – Resposta do filtro ativo - Simulação 66

Figura 30 – Resposta do filtro ativo – Placa de condicionamento 66

Figura 31 – Sistema desenvolvido 67

Figura 32 – Interface no LCD. a) Na esquerda – programação durante a inicialização, b) Na direita – dados durante a utilização 68

Figura 33 – Interface do software desenvolvido 68

Figura 34 – Comparação dentro do laboratório: medição de tensão 69

Figura 35 – Comparação dentro do laboratório: medição de corrente 70

Figura 36 – Resultados da medição realizada com o smart meter. a) Consumo acumulado e potência aparente instantânea; b) tensão e corrente 70

Figura 37 – Teste em ambiente não controlado: medição de tensão 71

Figura 38 – Teste em ambiente não controlado: medição de corrente 71

Figura 39 – Resultados da medição realizada com o smart meter. a) Consumo acumulado e potência aparente instantânea; b) tensão e corrente 72

Figura 40 – Resultados da medição realizada com o smart meter. a) Consumo acumulado e potência aparente instantânea; b) tensão e corrente 73

Figura 41 – Tensão: eixo esquerdo; Corrente: eixo direito 75

Figura 42 – Acumulado em VAh e Wh 75

Figura 43 – Potências: eixo esquerdo; FD e FP: eixo direito 75

Figura 44 – Tensão: eixo esquerdo; Corrente: eixo direito 76

Figura 45 – Acumulado em VAh e Wh 76

Figura 46 – Potências: eixo esquerdo; FD e FP: eixo direito 76

LISTA DE TABELAS

Tabela I – Principais informações do medidor.....38

Tabela II – IqmathLib: tipos de variáveis 55

Tabela III – Teste dos algoritmos – Sinais gerados via software.....86

Tabela IV – Teste dos algoritmos – Sinais gerados via gerador arbitrário 87

Tabela V – Estimativa de custos para confecção do medidor – Ano 2014.....88

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A/D – Conversor Analógico Digital
AMI – Advanced Metering Infrastructure
AMR – Automatic Meter Reading
ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica
ASCII – American Standard Code for Information Interchange
CISC – Complex Instruction Set Computer
CLP – Controlador Lógico Programável
DFT – Discret Fourier Transform
DHT – Distorção Harmônica Total
DR – Demand Response
DSM – Demand Side Management
EMS – Energy Management System
EPRI – Electric Power Research Institute
FC – Frequência de Corte
FD – Fator de Deslocamento
FP – Fator Potência
FPU – Floating-Point Unit
I2C – Inter-Integrated Circuit
IDE – Integrated Development Environment
IEEE – Institute of Electrical and Electronics Engineers
IHD – In Home Display
IIR – Infinite Impulse Response
P&D – Pesquisa e Desenvolvimento
PGA – Programmable Gain Amplifier
PLC – Power Line Carrier
QEE – Qualidade da Energia Elétrica
RAM – Random Access Memory
RISC – Reduced Instruction Set Computer
RMS – Root Mean Square (Raiz Quadrática Média)
RNA – Redes Neurais Artificiais
RTC – Real Time Clock

SCADA – Supervisory Control and Data Acquisition

SPI – Serial Peripheral Interface

THD – Total Harmonic Distortion

USART – Universal Synchronous/Asynchronous Receiver/Transmitter

USB – Universal Serial Bus

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 16
1.1 Motivação 16
1.2 Objetivo 17
1.3 Organização do trabalho 17
1.4 Publicações 18
2 SMART GRIDS E SMART METERS 20
2.1 Smart grids 22
2.2 Smart meters 24
2.3 Smart meters e smart grids em prol da eficiência energética 26
2.4 Tendências futuras em smart grids 31
2.5 Visão dos consumidores sobre smart grids 33
2.5.1 Realização de uma pesquisa online e os resultados obtidos 33
2.6 Smart grid e smart metering na prática 36
2.6.1 Projeto 1 – Coreia 37
2.6.2 Projeto 2 – Portugal 39
2.7 Considerações finais 43
3 DESENVOLVIMENTO DO SMART METER PROPOSTO 45
3.1 Motivação 45
3.2 O sistema embarcado desenvolvido 47
3.3 Particularidades dos algoritmos e otimização dos códigos 52
3.3.1 Algoritmo RMS 53
3.3.2 Operação em ponto fixo 54
3.3.3 Cálculo do THD 56
3.3.4 Cálculo FD e FP 57
3.3.5 Cálculo das potências 60
3.3.6 Armazenamento dos dados na memória flash 61
3.3.7 Relógio de tempo real 62
3.4 Condicionamento dos sinais 63
3.5 Dados coletados pelo smart meter desenvolvido 67
3.6 Resultados obtidos 69
3.7 Custo estimado do medidor desenvolvido 77

3.8 Considerações finais 77
4 CONCLUSÕES 78
4.1 Conclusões gerais 78
4.2 Trabalhos futuros 79
REFERÊNCIAS 81
APÊNDICE I – Teste algoritmos – Sinais gerados via software 86
APÊNDICE II – Teste algoritmos – Sinais gerados via interface 87
APÊNDICE III – Tabela de custos 88

1 INTRODUÇÃO

1.1 Motivação

As *smart grid*s ou redes inteligentes estão cada dia mais próximas dos consumidores, principalmente considerando-se os consumidores residenciais de baixa tensão. Existem inúmeras vantagens em sua utilização e dentre elas pode-se citar o monitoramento contínuo da rede de modo abrangente, monitoramento do padrão de qualidade de energia elétrica (QEE), integração entre as redes e possibilidade de introdução do conceito de geração distribuída e micro redes.

Um dos principais dispositivos necessários à implantação das *smart grids* são os *smart meters* ou medidores inteligentes, dispositivos eletrônicos com capacidade de medição, processamento e transmissão dos dados referentes ao consumo elétrico de cada unidade consumidora, possibilitando análises que levem ao conhecimento dos hábitos de consumo.

Devido às dificuldades relacionadas à expansão física dos meios de transmissão e distribuição de energia, desde as grandes unidades geradoras até os consumidores finais, torna-se atrativo para as concessionárias de energia a conscientização dos consumidores finais sobre os impactos relacionados ao consumo exagerado de energia, ou através da ótica do consumidor, os benefícios da utilização racional e eficiente de energia elétrica. Neste âmbito, os medidores inteligentes tornam-se grandes aliados em prol da eficiência energética.

Segundo LAMIN (2009), medidores eletrônicos de energia já são realidade no setor elétrico, entretanto têm seu uso quase que restrito em subestações e pontos de conexão de fronteiras, mas este panorama tende a mudar com o advento das *smart grids*, levando essas novas tecnologias até os consumidores residenciais de maneira gradativa.

1.2 Objetivo

Este trabalho tem como foco o desenvolvimento de um s*mart meter* monofásico, levando em consideração baixo custo, precisão e flexibilidade de alterações, podendo transformar-se em uma importante ferramenta no desenvolvimento de testes *in-loco*, ou mesmo como uma ferramenta para coleta de dados dentro de ambientes de pesquisa.

Medidores inteligentes formam um novo padrão de medição eletrônica de energia elétrica que vem sendo adotado em diversos países do mundo, principalmente na América do Norte e Europa. Sendo este um pré-requisito para implantação e implementação das tecnologias, técnicas e conceitos relacionados às redes inteligentes.

Para dar início ao processo de desenvolvimento, realizou-se um estudo sobre os medidores inteligentes, suas características e atuação dentro de uma rede inteligente.

Essas novas tecnologias são grandes aliadas em busca de padrões mais eficientes no consumo de energia elétrica. Desta maneira, são abordados os aspectos mais relevantes disponíveis na literatura no que tange o impacto da implantação das s*mart grids* e dos s*mart meters* sobre os hábitos de consumo dos consumidores residenciais e seu potencial de eficiência energética.

De maneira simples, mensurar e avaliar o comportamento dos consumidores após a instalação destas novas tecnologias, ou seja, se a implantação das redes inteligentes e dos medidores inteligentes terá impacto sobre o comportamento dos consumidores, levando-os a consumirem energia elétrica de uma forma mais eficiente e racional, tornando o consumo mais eficiente em uma maneira geral.

1.3 Organização do trabalho

Esta dissertação está organizada da seguinte maneira:

- O Capítulo 1 apresenta uma breve introdução contendo a motivação e os objetivos relacionados ao desenvolvimento deste trabalho, além das publicações alcançadas durante o desenvolvimento do mesmo;
- O Capítulo 2 aborda as *smart grids*, os s*mart meters* e como estes conceitos influenciam na eficiência energética. Também são abordadas algumas possibilidades decorrentes da introdução das s*mart grids* e dos *smart meters* em um futuro próximo. São apresentados os resultados de uma pesquisa realizada com o objetivo de conhecer e avaliar o comportamento dos consumidores em relação a essas novas tecnologias. Também são apresentadas duas referências que demonstram o potencial das s*mart grids* e dos *smart meters* relacionado à eficiência no consumo de energia elétrica pelos consumidores residenciais;
- O Capítulo 3 expõe o desenvolvimento de um *smart meter* de baixo custo para coleta de dados e realização de testes *in-loco*, suas características técnicas e também os resultados dos testes realizados; e
- O Capítulo 4 apresenta as conclusões e também algumas possibilidades de trabalhos futuros.

1.4 Publicações

Durante a execução desta pesquisa foram elaborados alguns trabalhos com os resultados preliminares obtidos, bem como trabalhos realizados com o grupo de pesquisa do Laboratório de Sistemas de Potência e Técnicas Inteligentes (LSISPOTI), em eventos científicos.

Trabalhos Relacionados com o Tema da Pesquisa

- AMARAL, H. L. M.; SOUZA, A. N. **Development of a low cost smart meter to collecting data and in-place tests**. In: XI INDUSCON - 11th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications, 2014, Juiz de Fora/MG.
- AMARAL, H. L. M.; SOUZA, A. N.; GASTALDELLO, D. S.; FERNANDES, F.; VALE, Z. **Smart meters as a tool for energy efficiency**. In: XI INDUSCON - 11th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications, 2014, Juiz de Fora/MG.

- AMARAL, H. L. M. do. **Desenvolvimento de um Smart Meter:** um estudo sobre eficiência energética através das redes inteligentes. In: IV Seminário da Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, 2014, Bauru/SP. IV Seminário da Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, 2014.
- AMARAL, H. L. M.; SOUZA, A. N.; FERNANDES, F.; VALE, Z.; GASTALDELLO, D. S. **Smart Metering Como Ferramenta de Eficiência Energética**. In: V Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos - SBSE, 2014, Foz do Iguaçu/PR. Anais 2014, 2014.
- GOMES, L.; AMARAL, H. L. M.; FERNANDES, F.; FARIA, P.; VALE, Z.; RAMOS, C.; SOUZA, A. N. **Dynamic Approach and Testbed for Small and Medium Players Simulation in Smart Grid Environments**. In: 19th World Congress of the International Federation of Automatic Control – IFAC 2014, 2014, Cape Town - África do Sul.
- AMARAL, H. L. M.; SOUZA, A. N. **Estudo Sobre Smart Meter e Smart Grid Como Ferramenta Para Eficiência Energética Através da Bibliometria**. In: III Seminário da Pós Graduação em Engenharia Elétrica, 2013, Bauru. III Seminário da Pós Graduação em Engenharia Elétrica, 2013.

Artigos Completos Publicados em Periódicos

- AMARAL, H. L. M.; ZAGO, M. G.; SOUZA, A. N.; GASTALDELLO, D. S.. **Estudo e Desenvolvimento de um Gerenciador de Energia Para Equipamentos Eletromédicos - Benefícios da Realização de Upgrades**. Fatecnológica (FATEC-JAHU), v. 1, p. 391, 2013.

2 SMART GRIDS E SMART METERS

Os *smart meter*s e as *smart grid*s tem sido fontes de estudos em constante desenvolvimento.

Através do sistema *Web Of Science,* disponibilizado pela THOMSON REUTERS (2014), foi possível verificar o crescimento dos estudos bem como conhecer os principais países a desenvolvê-los.

Os estudos relacionados aos *smart meters* datam de 1998 com grande crescimento a partir de 2011. Já os estudos relacionados ao termo *smart grid* datam no sistema a partir de 2007 com grande crescimento a partir de 2010. Em ambos os casos os países predominantes nos estudos são os Estados Unidos, China e Canadá, respectivamente. A Figura 1 apresenta o gráfico de crescimento das publicações de acordo com os resultados apresentados pelo sistema. No total foram reportados 104 registros relacionados aos *smart meters* e 1641 relacionados às *smart grids*.

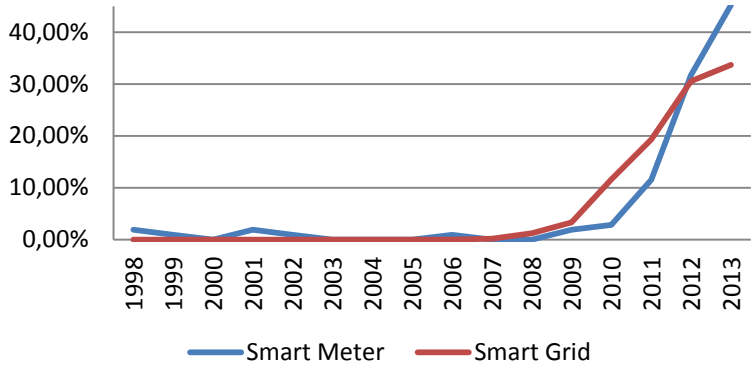


Figura 1 – Timeline dos estudos – Web of Science
Fonte: THOMSON REUTERS (2014)

O aumento da população mundial, os avanços tecnológicos e a facilidade de aquisição de dispositivos eletroeletrônicos podem ser relacionados diretamente com o aumento crescente na demanda por energia elétrica.

Milhões de dólares vêm sendo investidos pelas concessionárias, não somente de energia elétrica, mas também de água e gás canalizado para desenvolvimento das tecnologias e instalação dos medidores e de toda infraestrutura relacionada com a *smart grid* e os *smart meters* (AZIZ et al., 2013).

A plataforma "*Smart Metering Project Maps*" baseada no sistema "*Google Maps*" possibilita visualização dos projetos de maior destaque relacionados aos *Smart Meters* e as *Smart Grids* (HARRISON, 2007).

Apesar da plataforma não conter dados sobre projetos desenvolvidos recentemente, permite o conhecimento dos países e localidades com maior abrangência de projetos. Na América do Norte, grande parte dos projetos estão localizados nos Estados Unidos contando com menos projetos no México e Canadá. Na Europa, a Alemanha concentra grande parte dos projetos envolvidos, entretanto países como Portugal, Espanha, França, Reino Unido, Itália, e Dinamarca também possuem boa representatividade. A América do Sul, por sua vez, apresenta uma pequena quantidade de projetos quando comparada a outros continentes, grande parte destes estão implementados no Brasil.

Os benefícios destes sistemas também serão sentidos pelas agências reguladoras visto que os sistemas e sensores implantados facilitarão os processos de auditoria.

A total implantação dos sistemas inteligentes não será imediata, mesmo em países onde planos e projetos piloto já foram iniciados. O governo do Reino Unido estima que até 2020 todas as residências estejam utilizando *smart meters* possibilitando que os consumidores tenham pleno controle sobre seu consumo e gastos. Os gastos referentes à instalação dos novos medidores serão custeados pelos próprios consumidores, entretanto, estes valores devem ser recuperados em função das economias alcançadas após a instalação do sistema (ZHOU; XU; MA, 2010).

Não é possível afirmar que os custos arcados pelos consumidores serão recuperados em função da instalação dos novos medidores e subsequente economia de energia, visto que essa redução no consumo é dependente do comportamento dos consumidores, de suas possibilidades de controle e/ou deslocamento das cargas entre os períodos onde a energia for mais cara, para onde a energia for mais barata.

O custo referente à instalação dos medidores inteligentes é um dos pontos mais controversos e que poderá levar a grandes discussões envolvendo concessionárias, órgãos reguladores e principalmente os consumidores. Não se pode tratar como justa a imposição dos custos de instalação por parte dos

consumidores, principalmente nos casos onde sua escolha não for facultativa, mas sim obrigatória.

Através da resolução normativa 502, publicada pela AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL (2012), ficou definido que as concessionárias devem fornecer os medidores básicos sem custo aos consumidores, entretanto, este pode não ser o modelo ideal para um controle efetivo do consumo. Caso o consumidor julgue necessária a utilização de um modelo mais avançado, com informações mais detalhadas e maiores possibilidades de controle, deverá arcar com os custos do mesmo (CEMAT, 2012).

2.1 Smart grids

Atualmente as redes elétricas de transmissão e distribuição são utilizadas basicamente para transmissão da energia elétrica produzida em grandes unidades geradoras até os consumidores. Este transporte envolve perdas durante a transmissão e distribuição devido a diversos fenômenos físicos como o efeito *Joule*, efeito *skin* ou efeito pelicular e efeito corona.

Segundo dados do CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS - CGEE (s.d.), as perdas totais de energia no Brasil atingem a faixa dos 15%, o mesmo problema em outros países representa números da ordem de 6% a 7%.

Em alguns pontos, as redes também são utilizadas para transmissão de quantidade limitada de dados, necessários para o comando de dispositivos de controle da própria rede como religadores, reguladores e dispositivos de proteção.

Um dos maiores paradigmas a serem superados está relacionado à maneira de utilização das redes. Segundo FANG et al. (2012) e SUI; SUN; LEE (2011), *smart grid* é um novo conceito para as redes elétricas que utilizam vias bidirecionais, tanto para energia como para comunicação de dados, tecnologia da informação, tecnologias de segurança cibernética aplicada e inteligência computacional, integrando a geração, a transmissão, a distribuição e os consumidores para alcançar um sistema limpo, seguro, viável, confiável, e sustentável.

A Figura 2, adaptada de JEJU (2014), apresenta de maneira resumida a integração entre os elementos de uma rede inteligente. Consumidores residenciais,

comerciais, fábricas e unidades geradoras, interconectados através de vias bidirecionais tanto para dados como para energia elétrica permitindo a integração entre os membros da rede.

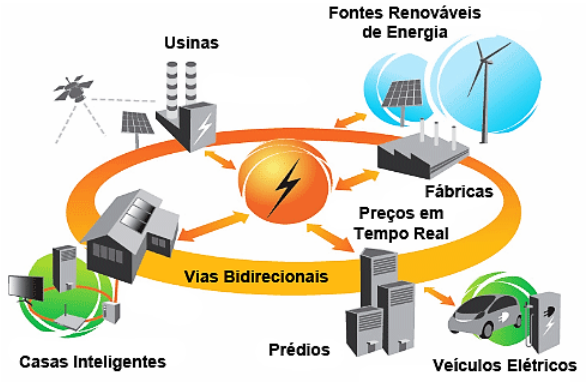


Figura 2 – Smart Grid
Fonte: adaptado de JEJU (2014)

Esta infraestrutura traz novas possibilidades, estimulando os consumidores a se tornarem membros ativos da rede. Participando por exemplo de programas de *demand response, ou,* programas para o corte ou redução de consumo além de poderem atuar como fornecedores de energia elétrica em pequena escala através de sistemas de micro geração instalados em suas residências (SUI et al., 2011). Bastante difundidos, pode-se citar os sistemas baseados em painéis fotovoltaicos, como o apresentado na Figura 3, onde a energia gerada pelo sistema pode ser utilizada para alimentar as cargas da residência, ou em momentos específicos, injetar energia na rede elétrica tornando este consumidor uma micro unidade de geração distribuída.

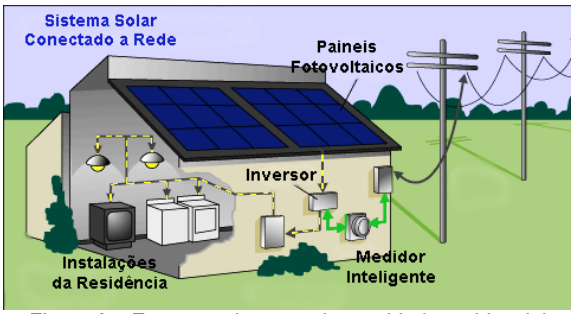


Figura 3 – Esquema de uma micro unidade residencial
Fonte: adaptado de ENERTECH (2013)

As fontes renováveis de energia vêm aumentando rapidamente de proporção. Em 2013 ocorreu uma grande expansão na capacidade mundial de energias renováveis, alcançando 22%, sendo que em 2007 eram cerca de 18% do total mundial, e 21% em 2012. Entretanto, recentemente as projeções em longo prazo

foram revisadas em virtude da diminuição de incentivos de diversos governos (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY - IEA, 2014; SCIENCEALERT, 2014).

O Brasil possui uma posição de destaque neste cenário mundial devido ao seu grande potencial hidroelétrico. Em 2012, 84,5% da matriz elétrica nacional era composta por fontes renováveis, em 2013 ocorreu um pequeno declínio devido às condições hidrológicas e ao aumento da geração térmica, entretanto, manteve-se em 79,3%. Relacionando-se a matriz energética total o Brasil ainda mantém uma posição de destaque, em 2013 o total de 41% da matriz era formada por fontes renováveis (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE, 2014).

Entre os modelos envolvendo as *smart grids*, as *Advanced Metering Infrastructure* (AMI) são vistas como chave para implementação das redes inteligentes pela comunicação bidirecional entre consumidores e distribuidores, possibilitando o controle remoto e também o gerenciamento da demanda de eletricidade (AZIZ et al., 2013; JUNG et al., 2013).

Entretanto, dificuldades relacionadas ao tratamento regulatório específico têm levado as concessionárias utilizem diferentes padrões em seus projetos piloto, utilizando os modelos que lhes são mais interessantes comercialmente (LAMIN, 2009). Essas dificuldades não ficam restritas ao território brasileiro, sendo uma das grandes barreiras encontradas em outros países para implantação destas novas tecnologias e conceitos.

2.2 Smart meters

Medidores eletromecânicos ainda são os tipos mais utilizados no setor elétrico, principalmente para medidores residenciais. Estes medidores registram basicamente o consumo acumulado de energia ativa da unidade consumidora. Alguns modelos de medidores eletromecânicos podem ser vistos na Figura 4.



Figura 4 – Medidores Eletromecânicos
Fonte: adaptado de ASSIMQUESEFAZ (2014); PORTAL DO ELETRICISTA (2014); PROCON (2014)

Periodicamente existe a necessidade da leitura dos valores registrados para fins de tarifação. Este processo é realizado manualmente por um leiturista de consumo. Além de tornar-se mais complexo com o aumento do número de consumidores das concessionárias, também é passível de erros de leitura por se tratar de um processo envolvendo fatores humanos.

As dificuldades envolvidas no processo de tarifação com os medidores convencionais levaram ao desenvolvimento de um sistema automático para medição do consumo de energia, este recebeu o nome *Automatic Meter Reading* (AMR). Este sistema pode ser considerado como o precursor das tecnologias mais recentes de medição de energia.

Segundo ARIF et al. (2013), os *smart meters*, são dispositivos de medição com capacidade muito superior em relação à quantidade de dados coletados e disponibilizados aos usuários, permitindo aos consumidores manterem-se bem informados em relação ao seu consumo de energia, facilitando decisões mais eficientes referentes ao uso da energia elétrica. É possível afirmar que os medidores inteligentes são a base para total implantação dos conceitos básicos das redes inteligentes e para isso faz-se necessária sua instalação em todas as unidades consumidoras da rede.

Uma das principais mudanças referentes aos medidores inteligentes tem relação com o processo de tarifação. Sua introdução abre a possibilidade de medições em pequenos intervalos de tempo. Vias bidirecionais de comunicação entre os consumidores e os distribuidores possibilitarão o conhecimento em tempo real da demanda e necessidades de cada consumidor.

Em alguns casos os medidores poderão unificar processos concentrando a medição e energia elétrica, água e gás canalizado em somente um dispositivo (ZHOU et al., 2010).

Além da medição para o processo de tarifação, surgem diversas possibilidades com a introdução dos *smart meters*. Dentre elas pode-se citar o monitoramento contínuo da rede elétrica, monitoramento e conhecimento dos hábitos dos consumidores de maneira mais abrangente e realista, como uma ferramenta em potencial para controle da qualidade da energia elétrica e principalmente como uma ferramenta em prol da conscientização dos consumidores em buscar de um consumo mais eficiente (WERANGA; CHANDIMA; KUMARAWADU, 2012). Os dados fornecidos pelos medidores inteligentes poderão

ser processados pelas concessionárias com intuito de estudo das curvas de carga e padrões de consumo de cada região mais detalhadamente.

Alguns consumidores comerciais ou mesmo residenciais já tem a leitura de seu consumo realizada por medidores eletrônicos, entretanto, geralmente são modelos com baixo perfil de interatividade e pequena quantidade de informações disponibilizadas, conforme pode ser visto na Figura 5.



Figura 5 – Medidores Eletrônicos
Fonte: adaptado de ECHELON (2014); LANDIS+GYR (2014); SUNRISE (2014)

2.3 Smart meters e smart grids em prol da eficiência energética

Os sistemas utilizando medidores inteligentes vêm sendo considerados como uma alternativa efetiva na busca por melhores padrões de consumo de energia elétrica, ou seja, conscientização dos consumidores em busca de um consumo mais eficiente e consciente (LEITE, 2013; U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2010; WERANGA et al., 2012).

Existem diversas dificuldades, físicas, financeiras e também legais a cerca da expansão tradicional do sistema elétrico, ou seja, construção de grandes unidades geradoras conjuntamente a novas linhas de transmissão. Desta maneira torna-se complexo acompanhar o aumento na demanda de energia elétrica desencadeada pelos avanços tecnológicos e econômicos. Por outro lado, consultores e estudiosos tem afirmado de maneira crescente que a eficiência energética é a solução mais rápida, barata e limpa para um sistema elétrico sobrecarregado (CANAVAGH; HOWAT, 2012).

É de interesse das concessionárias de energia conscientizar os consumidores finais sobre os impactos relacionados ao consumo exagerado de energia, ou pela ótica do consumidor, sobre os benefícios da utilização racional e eficiente de energia

elétrica. Neste âmbito, os medidores inteligentes tornam-se grandes aliados em prol da eficiência energética (CHOI et al., 2009; ZHOU et al., 2010).

Uma alternativa visando minimizar os custos relacionados à expansão do sistema, ou mesmo posterga-las para um momento mais oportuno, é permitir a participação de micro unidades geradoras de energia através de fontes complementares de energia, tradicionalmente nomeadas como fontes alternativas de energia. Neste contexto pode-se citar a energia eólica e principalmente a energia solar dentro do ambiente residencial. Entretanto, deve-se lembrar de que atualmente não existe o domínio tecnológico suficiente para tornar essas tecnologias altamente populares, ou mesmo eficientes, ao ponto de poderem ser consideradas como um real alternativa para suprir as necessidades de uma residência.

Novamente, para implantação deste conceito faz-se necessária à instalação dos *smart meters,* com capacidade de registrar a demanda da unidade consumidora bem como a quantidade de energia fornecida para a rede. Os benefícios serão observados por todos os consumidores.

A conscientização dos consumidores é um dos principais objetivos quando se discute sobre eficiência energética. A possibilidade de o consumidor poder verificar em tempo real os dados relativos ao seu consumo de energia elétrica, valor instantâneo de consumo, projeções de consumo, entre outras informações, leva-o a repensar sobre seu consumo de energia. Nesta ótica a utilização de medidores inteligentes é uma maneira de educar os consumidores em prol de práticas de consumo mais eficientes.

Entretanto, é importante ressaltar que a introdução de medidores inteligentes, por si só, não garante um melhor padrão de consumo. Segundo ZHOU et al. (2010) faz-se necessária à introdução de interfaces visuais com informações simples, de fácil acesso e entendimento pelos consumidores. A Figura 6 apresenta uma interface aparentemente simples, mas que pode facilitar muito o entendimento dos dados de consumo pelos consumidores (ENERGY SAVING TRUST, 2014).



Figura 6 – Simples interface com o usuário
Fonte: ENERGY SAVING TRUST (2014)

Na Figura 7 são apresentados modelos de interfaces com o usuário mais avançadas e interativas, atraindo os usuários para sua utilização.



Figura 7 – Interfaces com o usuário
Fonte: Adaptado de TENDRIL INC; CHAMELEON TECHNOLOGY; MENTOR GRAPHICS

Além das interfaces, outro grande diferencial esta relacionado à conectividade dos dispositivos. Muito se discute sobre as *smart homes* ou casas inteligentes, onde grande parte dos eletroeletrônicos estarão conectados trocando informações. O usuário poderá verificar através de seu *smartphone* ou computador o *status* atual de seu consumo, dispositivos conectados e em uso além de receber alertas online através de mensagens instantâneas, sms ou e-mail. Em alguns casos a interatividade poderá chegar a dispositivos como a TV digital, como ocorreu no “P&D 327 – Sistema interativo integrado AMI / TV digital”, executado pela CEMIG (2009). O projeto piloto envolveu o desenvolvimento de um modelo de *set top box* que integrasse o sistema AMI ao sistema de TV digital utilizado no Brasil, permitindo interatividade com os consumidores, acesso bilateral aos dados de consumo e também controle das unidades consumidoras por parte da concessionária permitindo, por exemplo, cortes e/ou religamentos por via remota.

Outra possibilidade tem relação à adoção de tarifas diferenciadas em relação ao horário, levando os consumidores a consumirem menos nos períodos de pico, onde a energia elétrica é mais cara (minimizando as perdas para as concessionárias de energia, desde perdas por sobrecarga nos transformadores, como as perdas na transmissão pelo excesso de carregamento das linhas) e consumirem mais em outros momentos que julgarem mais econômicos.

O conceito de *Demand Response* (DR), *Demand Side Management* (DSM), ou gerenciamento pelo lado da demanda foi introduzido inicialmente na década de 80 pelo *Electric Power Research Institute* (EPRI), trata-se de um conceito com atividades envolvendo concessionárias e governo para aumentar o bem estar social. Isto possibilita um aumento na eficiência de uso final da eletricidade e fontes

relacionadas através da minimização do consumo nos momentos de pico, regras de ajuste estrutural, controle do preço e também otimização dos equipamentos e tecnologias.

SUI et al. (2011) afirmam, para que o DSM tornar-se mais efetivo é necessário uma intensa integração entre consumidores e suas cargas, informações sobre sua utilização e o centro de controle. No *demand response* os consumidores voluntários terão cargas não prioritárias desligadas para minimizar o carregamento nos momentos de pico ou para manter os níveis e estabilidade do sistema.

Os dados obtidos pelos medidores inteligentes podem ser utilizados pelas concessionárias para obtenção de curvas de carga reais que por sua vez impactariam nos processos revisórios das tarifas. O *demand response* conjuntamente aos medidores amplia a capacidade de gerenciamento da rede, maximizando a eficiência energética (AZIZ et al., 2013). Os consumidores devem sentir os benefícios subsequentes às tarifas diferenciadas através da diminuição no valor desembolsado com as contas de energia elétrica. Em longo prazo, a minimização da necessidade de investimentos referentes à expansão da rede será refletida nos processos de revisão tarifária, novamente sendo interessante aos consumidores (LAMIN, 2013).

Um grande benefício decorrente das tarifas e também do *demand response* é a possibilidade de deslocamento das cargas para fora dos horários de pico ou de maior carregamento, algo complexo na estrutura atual de tarifação já que os consumidores não tem um retorno direto sobre tal ação (TEMNEANU; ARDELEANU, 2013).

O padrão de cargas tradicionalmente não é rígido, possuindo certa flexibilidade que pode ser aproveitada em benefício das redes elétricas e do próprio consumidor (FERNANDES et al., 2010). O DSM pode aproveitar essa flexibilidade, para isso deve trabalhar de maneira complementar as redes inteligentes (SUI et al., 2011).

Outro fator importante é a adoção dos medidores inteligentes juntamente com o emprego dos conceitos e tecnologias da geração distribuída, micro redes e *demand response* tornando a rede elétrica menos susceptível a falhas, desde que respeitados seus limites de geração.

Em um primeiro momento essa afirmação pode parecer contraditória, visto a introdução de mais equipamentos eletrônicos, também susceptíveis a falhas,

conectados à rede. Entretanto, de maneira geral o sistema elétrico se tornaria mais flexível e seguro contra falhas nos principais dispositivos relacionados ao sistema de distribuição, tais como os transformadores de tensão utilizados para abaixar a tensão da rede primária ao nível da rede secundária. Por exemplo, a falha de um transformador da rede de distribuição possivelmente poderá ser minimizada, ou suprimida temporariamente, através da entrada de um grupo de consumidores que possuam micro unidades geradoras em suas residências. Neste instante o conceito de demand response pode auxiliar no controle das cargas, possibilitando que os limites suportados pelas micro unidades não sejam ultrapassados e que as cargas prioritárias se mantenham funcionando.

Os benefícios decorrentes da implantação do sistema se estenderão a todas as unidades consumidoras, não ficando restritos somente aos consumidores que participarem ativamente da rede como micro unidades geradores de energia.

Segundo CHOI et al. (2009) diversos países já alcançaram resultados positivos em seus projetos piloto relacionados à *smart metering* e *smart grid*. Durante o período entre 2009 e 2013 foi criado um quadro de trabalho pelo governo Australiano para implantação dos medidores inteligentes, como resultado alcançou-se uma redução entre 4% e 10% do consumo total e redução de até 3,5% na emissão de gases do efeito estufa. Efeito similar ocorreu em um projeto liderado pelo governo dos Estados Unidos após a falência de uma concessionária do sul da Califórnia, onde os resultados alcançaram reduções no consumo entre 11% e 13% durante o período de estudo em 2007.

Outra nova modalidade que surge é o *prepaid enegy*, ou, energia pré-paga. Um padrão ainda não oficial no Brasil, mas que já utilizado em países como Estados Unidos e Inglaterra. Nesta modalidade os consumidores compram créditos de energia elétrica, de maneira homóloga aos serviços oferecidos pelas operadoras de telefonia móvel (UK POWER, 2014).

O serviço de energia pré-paga envolve os consumidores de maneira contínua, visto que requer o constante monitoramento do balanço de energia comprada/consumida (ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE - EPRI, 2010). Dados demonstram uma relação entre a modalidade pré-paga e a economia de energia, em alguns casos originando de 5% a 15% de redução no consumo, entretanto, essa relação ainda não é muito bem documentada (OZOG, 2013).

Os principais benefícios estão relacionados com o controle dos débitos e quantidade de energia utilizada, além de prevenir contas com valores inesperados. Como principal desvantagem é apontado o custo médio da energia elétrica, acima do tradicional (USWITCH, 2014). A Figura 8 apresenta um modelo de medidor para energia pré-paga.

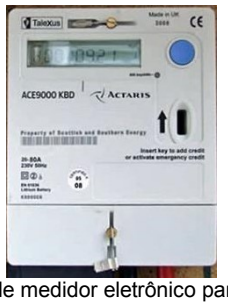


Figura 8 – Modelo de medidor eletrônico para energia pré-paga
Fonte: USWITCH (2014)

Na seção a seguir são apresentadas algumas tendências para o futuro, decorrentes da introdução das redes inteligentes e dos medidores inteligentes.

2.4 Tendências futuras em smart grids

O sistema AMI é um dos mais presentes nos estudos e projetos executados, entretanto o sistema EMS também possui inúmeros benefícios. No futuro pode-se esperar um novo sistema híbrido, conciliando a característica de tarifas variáveis do sistema AMI com a estrutura de informações detalhadas do sistema EMS em busca de melhores níveis de eficiência energética.

A qualidade e clareza das informações são requisitos básicos para que se tornem interessantes aos consumidores e impactem diretamente sob seu comportamento.

A possibilidade de consulta dos consumos anteriores, das médias de consumo, bem como previsões futuras baseadas no histórico comportamental da unidade e também da região onde está instalado, simplifica consideravelmente o controle dos gastos. Para este propósito sistemas com inteligência artificial, tais como redes neurais artificiais (RNA) ou filtro de Kalman são extremamente úteis, possibilitando a formação dos padrões do usuário e obtenção de previsões de consumo.

A análise comportamental dos dados coletados também abre novas possibilidades. Por exemplo, alterações drásticas nos padrões de consumo ou um consumo elevado e contínuo totalmente fora do padrão podem indicar problemas com a instalação do consumidor, sendo possível uma interação com o mesmo para a comunicação dos possíveis problemas existentes.

Outro problema que pode ser minimizado com a utilização dos medidores inteligentes está relacionado com as fraudes de energia. Estas representam energia "perdida" pelas concessionárias, podendo ser relacionados com a eficiência do sistema como um todo. As perdas relacionadas a furtos e fraudes de energia somam aproximadamente R$ 5 bilhões em prejuízos as concessionárias, representando entre 4% e 17% da tarifa final.

Mesmo com a utilização dos medidores inteligentes ainda existe a possibilidades das fraudes nos medidores e principalmente das ligações clandestinas, tradicionalmente conhecidas como "gatos de energia". Neste ponto, os medidores inteligentes instalados na região em questão facilitarão a realização de um balanço do montante de energia que está sendo fornecida e também de quanta energia está sendo efetivamente tarifada. Este processo facilitará a identificação dos pontos mais problemáticos bem como a tomada de medidas visando minimizar seu impacto.

De acordo com a ANEEL, a concessionária AMPLA no estado do Rio de Janeiro possuía índices de perdas não técnicas de 27,13% em 2009, e este percentual de perdas era rateado entre todos os consumidores pagantes. Através de um programa de medição avançada de energia elétrica, foi possível alcançar uma redução de 20% nas perdas por furto de energia (LEITE, 2013).

Os medidores inteligentes tradicionalmente possuem algoritmos para detecção de possíveis fraudes. Os dados coletados pelos medidores inteligentes podem ser utilizados para alimentar RNA's para então classificar os possíveis fraudadores através de mudanças em seu comportamento de consumo (RAMOS et al., 2011). Medidores inteligentes podem ser a melhor maneira de combater as fraudes de energia devido à sua eficiência, segurança e imunidade a muitas "manobras" utilizadas para fraudar medidores eletromecânicos (ANAS et al., 2012).

Segundo AZIZ et al. (2013), os sensores necessários aos medidores inteligentes em um sistema AMI poderiam ser à base de um sistema inteligente para compensação e controle de reativos. A partir dos dados obtidos pelos medidores,

inversores inteligentes seriam acionados compensando reativos e quedas de tensão instantaneamente. Os sensores poderiam também ser utilizados como ferramenta para medição e controle de outros parâmetros relacionados à qualidade da energia elétrica como a distorção harmônica. Novamente os inversores inteligentes poderiam ser acionados para mitigar distorções harmônicas acima dos valores permitidos por norma, minimizando o fluxo de corrente nas linhas e consequentemente a quantidade de perdas na transmissão e distribuição.

Na próxima seção são apresentados os resultados de uma pesquisa realizada com os consumidores.

2.5 Visão dos consumidores sobre smart grids

Os benefícios decorrentes da implantação das redes inteligente e dos medidores inteligentes são bastante claros. Entretanto, muitos dos resultados relacionados à eficiência energética dependem das ações executadas pelos consumidores, em decorrência da instalação dessas novas tecnologias. Podem-se relacionar os resultados com mudanças de comportamento dos consumidores.

Os resultados esperados relacionados à eficiência energética podem parecer bastante óbvios visto que impactam diretamente no montante de energia consumida e consequentemente no valor pago pelo consumidor, entretanto, fazem-se necessários estudos que comprovem estes resultados, ou mesmo estudos preliminares avaliando o comportamento a ser esperado dos consumidores. De uma maneira simples, desenvolver pesquisas com os consumidores coletando dados sobre o que pensam sobre essas novas tecnologias, sua expectativas e como esperam agir perante elas.

2.5.1 Realização de uma pesquisa online e os resultados obtidos

Desenvolveu-se uma pesquisa *online* para coletar dados e avaliar o comportamento a ser esperado dos consumidores com o advento das *smart grids* e dos *smart meters*.

Atualmente a pesquisa continua ativa podendo ser acessada e respondida pelos usuários, possibilitando a utilização dos dados coletados em trabalhos futuros (AMARAL, 2014).

Os resultados apresentados refletem o comportamento de um pequeno grupo de 127 participantes voluntários, entretanto, de acordo com outros estudos relacionados e citados, é possível concluir que este comportamento ocorra de uma forma mais abrangente, trazendo benefícios ao setor elétrico e aos próprios consumidores.

Foram coletados alguns dados gerais para situar os resultados da pesquisa, dentre eles a faixa etária dos participantes, onde reside, escolaridade, renda familiar, quantidade de moradores da residência e consumo médio mensal.

O principal objetivo da pesquisa foi avaliar o conhecimento dos participantes a cerca das redes inteligentes e dos medidores inteligentes bem como o comportamento esperado a partir da instalação das mesmas.

A seguir serão apresentados os principais resultados.

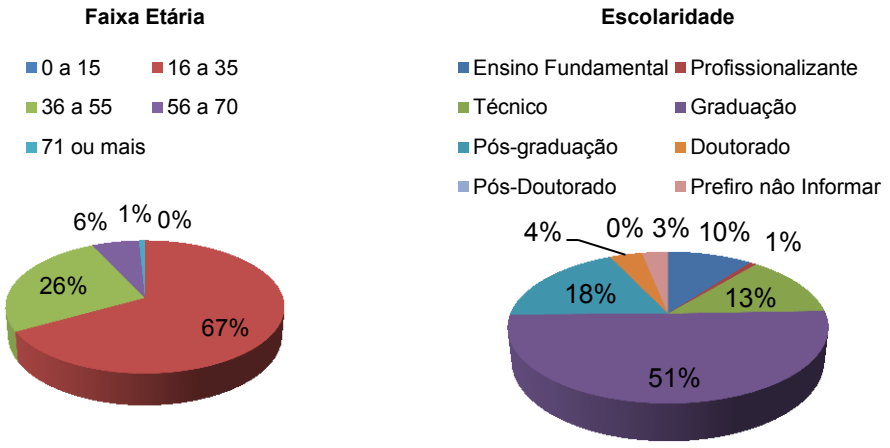


Figura 9 – Resultados da Pesquisa
Fonte: Arquivo Pessoal

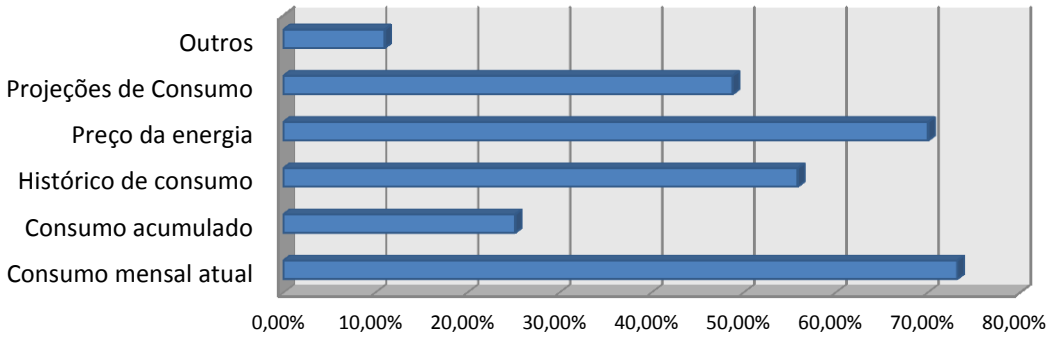
Perguntou-se aos participantes se possuíam conhecimento sobre *smart grid* e *smart meter*. Apenas 29% relataram algum conhecimento sobre os assuntos. Este comportamento já era esperado por se tratar de temas mais técnicos, entretanto não se deve esperar um conhecimento técnico aprofundado por parte dos consumidores, mas sim um conhecimento sobre o que são essas novas tecnologias, seus benefícios e também o porquê de terem seus medidores substituídos no futuro, evitando problemas justamente relacionados com a falta de informação da comunidade.

Através de resposta livre indagou-se o que imaginavam serem os temas. Grande parte das respostam citam sobre medidores com maior capacidade de medição, sobre a capacidade de informar os consumidores sobre informações diversas e também princípios de fontes alternativas de energia, aproximando-se muito das definições e possibilidades relacionadas às redes inteligentes e aos medidores inteligentes.

Cerca de 90% dos participantes relataram saber quais os equipamentos eletroeletrônicos de maior consumo elétrico em sua residência e cerca de 89% dos participantes acreditam ser possível economizar energia em suas residências. Um ponto bastante interessante, ressaltando um alto grau de conscientização dos participantes, entretanto, evidencia que seu comportamento depende de incentivos externos ou ações externas.

Quando indagados sobre o tipo de medidor disponível em sua residência, 57% possuem medidores eletromecânicos, 10% medidores eletrônicos e 33% não souberam informar qual o tipo de medidor. Independentemente do tipo de medidor, 61% responderam que os dados disponibilizados pelos mesmos não possuem utilidade aos consumidores, algo esperado visto que grande parte destes medidores registra somente o consumo acumulado de energia.

Dos participantes, 94% responderam acreditar que um medidor interativo e com possibilidade de acesso a mais informações poderia influenciar diretamente no consumo e economia de energia elétrica. Sendo este um dos resultados mais importante apontados pela pesquisa. As principais informações apontadas pelos participantes podem ser vistas na Figura 10.



	Consumo mensal atual	Consumo acumulado	Histórico de consumo	Preço da energia	Projeções de Consumo	Outros
Dados mais importantes	73,23%	25,20%	55,91%	70,08%	48,82%	11,02%

Figura 10 – Informações mais importantes
Fonte: Arquivo Pessoal

O consumo do mês corrente seguido pelo peço da energia são considerados as principais informações que influenciariam no comportamento dos consumidores. Contundo cerca de 12% dos pesquisados temem que medidores mais avançados possam refletir negativamente de alguma maneira. A principal justificativa apontada pelos pesquisados está relacionada aos custos de aquisição e instalação dos medidores. Existe também uma preocupação relacionada à privacidade dos dados, má utilização dos mesmos e também sobre fraudes. Estes três últimos itens citados vêm sendo amplamente abordados nos estudos mais recentes.

Na seção a seguir são apresentadas duas referências disponíveis na literatura, que exemplificam as possibilidades e o potencial de eficiência energética através das tecnologias associadas às redes inteligentes.

2.6 Smart grid e smart metering na prática

Mundialmente existem diversos projetos em desenvolvimento, conforme pode ser visto na Figura 11.



Figura 11 – Smart grid no mundo
Fonte: HARRISON (2007)

A seguir serão apresentados dois projetos com focos diferentes e em países diferentes, que demonstram os potenciais benefícios decorrentes da implantação

dos sistemas. O primeiro projeto, realizado na Coreia, é abordado em CHOI et al. (2009). O segundo projeto, realizado em Portugal, é abordado em FERNANDES et al. (2010). Os principais pontos de cada projeto serão abordados, detalhados e discutidos.

2.6.1 Projeto 1 – Coreia

O aumento no custo dos combustíveis fósseis tem impactado diretamente aos geradores e fornecedores de energia, desencadeando enormes prejuízos econômicos. Dados da *Korea Electric Power Corporation* (KEPCO) apontam prejuízos da ordem de U$ 1,3 bilhão no ano de 2008 em função do aumento do preço dos combustíveis. Nesta realidade a introdução do conceito de *smart metering* aliado à instalação de interfaces com o usuário de fácil visualização e preços dinâmicos tornam-se grandes aliados para conscientizar a população a um padrão de consumo mais eficiente e econômico (CHOI et al., 2009).

O projeto piloto em questão teve seu desenvolvimento iniciado em setembro de 2008 e implantação para testes entre dezembro de 2008 e fevereiro de 2009. Foram selecionados 77 participantes voluntários onde os sistemas foram instalados, sendo 24 residências em Seoul e 53 em Cheongju. As residências de Seoul possuíam maior área construída, representando um grupo de moradores com maior poder aquisitivo. Já as residências de Cheongju possuíam em média metade do tamanho representando grupos sociais com menor poder aquisitivo. Essa abordagem permite avaliar os resultados de maneira mais ampla.

O sistema desenvolvido foi baseado no padrão *Energy Management System* (EMS) buscando aproveitar as infraestruturas disponíveis, minimizando os gastos associados. No sistema EMS, a busca pela eficiência energética é cultivada através do autogerenciamento, ou seja, através da disponibilização de informações detalhadas sobre o consumo atual ou do passado e com previsões futuras sem necessitar propriamente de mudanças na tarifa. Diferentemente, o sistema AMI induz economia de energia através das tarifas variáveis em função do tempo.

O principal foco do estudo foi avaliar o impacto das interfaces com o usuário, ou *In Home Display* (IHD).

A estrutura do sistema pode ser vista na Figura 12. Em virtude de grande parte das residências locais utilizarem ferroconcreto, optou-se pela utilização do sistema *Power Line Carrier* (PLC) para transmissão dos dados através da própria fiação instalada na residência, ao invés da utilização de sistemas wireless de transmissão de dados como Wifi, ZigBee, entre outros. O sistema PLC realiza a comunicação entre os medidores de cada consumidor com sua respectiva IHD e também a comunicação entre os consumidores e o dispositivo responsável pela concentração dos dados coletados e transmitidos. A conexão do concentrador com o servidor da companhia é realizada através do protocolo *ethernet*.

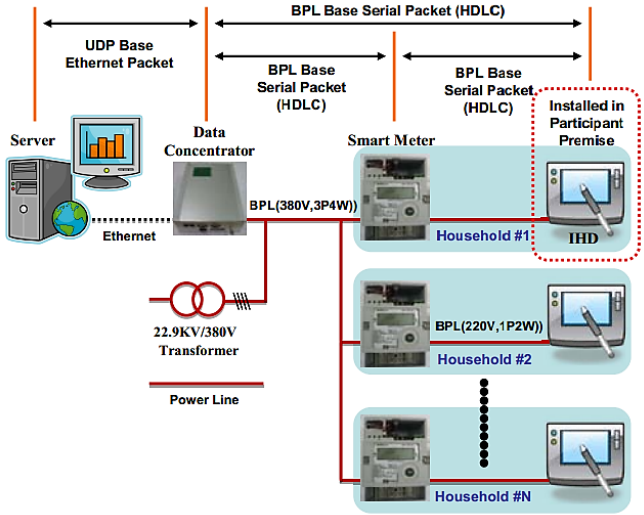


Figura 12 – Estrutura geral do sistema desenvolvido para o projeto
Fonte: CHOI et al. (2009)

A interface com o usuário deveria ser simples e intuitiva facilitando o entendimento dos dados apresentados. A Tabela I apresenta as principais informações disponibilizadas aos consumidores.

Tabela I – Principais informações do medidor

Informações sobre o uso da energia	Consumo acumulado
	Fatura atual até o momento
	Estimativa da fatura mensal
	Fator potência médio
	Nível progressivo atual*
Dados estatísticos	Gráfico de consumo no tempo
	Consumo do mês anterior
	Fatura do mês anterior
	Consumo anual
Utilidades	Emissão de gases do efeito estufa
	Informações sobre o tempo
	Dicas e informações sobre energia

* Valor variável de acordo com o nível de consumo

Para facilitar o desenvolvimento adotou-se a utilização de um *ultra mobile PC* (UMPC) como interface, ao invés de utilizar interfaces proprietárias ou desenvolvidas especificamente para o projeto. Tal adoção agiliza o processo de desenvolvimento do projeto piloto, mas pode tornar-se algo inviável em um projeto de larga escala devido ao custo envolvido nos equipamentos.

A fase de testes in loco teve duração de dois meses. No primeiro mês foram instalados somente os *smart meters*, sem a instalação das interfaces IHD, servindo como padrão de controle do consumo normal dos participantes. No mês seguinte foram instaladas as interfaces IHD para avaliar o comportamento dos consumidores e o impacto no consumo de energia elétrica decorrente da instalação das interfaces.

Os resultados obtidos apontaram redução no consumo de energia elétrica em 48 das 53 residências em Cheongju, com redução média de 15,9%, e redução em 22 das 24 residências de Seoul, com redução média de 7,5%. Estes percentuais representam uma redução média mensal por residência de 38 kWh em Cheongju e 22 kWh em Seoul conforme a Figura 13.

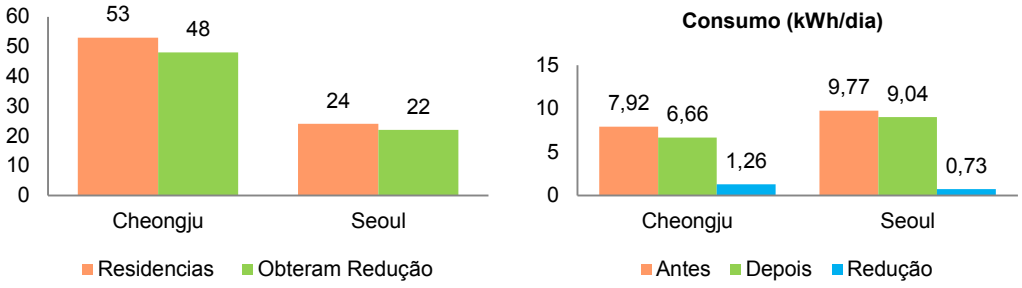


Figura 13 – Redução de consumo
Fonte: CHOI et al. (2009)

2.6.2 Projeto 2 – Portugal

Um *Supervisory Control and Data Acquisition* (SCADA) é uma plataforma que incorpora diversos componentes e vem sendo aplicada aos sistemas elétricos para monitorar, operar e controlar cargas, desenvolvendo importante papel no controle da segurança e viabilidade dos sistemas elétricos (FERNANDES et al., 2010).

O trabalho apresenta uma ferramenta focada nas *smart homes*, ou residências inteligentes. A ferramenta permite o controle de uma residência com geração distribuída bem como suas cargas através de um sistema SCADA

inteligente. O sistema proposto trabalha em *real-time*, sendo responsável por gerenciar as cargas nos momentos de escassez no fornecimento de energia, tornando-se altamente atrativo e benéfico aos consumidores e também à rede elétrica.

O gerenciamento das cargas conectadas ao sistema é baseado em uma ordem de mérito designada pelo usuário. O *set-point,* ou ponto de operação, onde o sistema inicia a otimização e controle das cargas também é definido pelo usuário, entretanto o sistema tem autonomia para intervir neste processo de acordo com a capacidade da unidade de geração distribuída instalada.

Os estudos foram realizados no *Intelligent Energy Systems Laboratory* (LASIE). A plataforma de testes conta com fontes renováveis de energia tais como turbinas eólicas, painéis fotovoltaicos e também uma célula combustível, podendo operar no modo ilhado ou conectado a rede elétrica. A Figura 14 apresenta a estrutura interna de um dos laboratórios.



Figura 14 – Laboratório interno com a plataforma de testes
Fonte: Arquivo pessoal

A Figura 15 apresenta a sala de controle contendo os inversores conectados as unidades de energia renováveis e também o terraço do prédio em que estão instaladas as turbinas eólicas e os painéis fotovoltaicos.



Figura 15 – Sala de controle e terraço do prédio
Fonte: Arquivo pessoal

A Figura 16 apresenta um esquema das instalações do laboratório e das conexões entre os componentes do sistema. As unidades de energia renováveis são conectadas a rede interna através de seus inversores, podendo alimentar a rede além de carregar o sistema de baterias que pode ser acionado na falta de energia. O sistema do laboratório recebe dados dos inversores e das cargas conectadas ao sistema permitindo o controle dos mesmos.

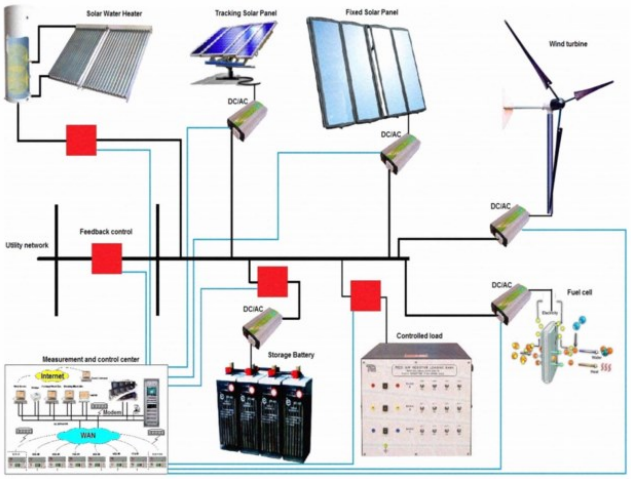


Figura 16 – Sistema renovável instalado no laboratório LASIE
Fonte: FERNANDES et al. (2010)

O estudo de caso leva em consideração cargas não controláveis e também cargas controláveis pelo sistema SCADA durante um período de 12 horas. O resumo dos resultados durante o período de teste pode ser visto na Figura 17. A linha pontilhada azul representa o set point definido, as barras vermelhas indicam o consumo elétrico antes do processo de otimização e controle e as barras verdes representam o consumo após a otimização e controle realizados pelo sistema.

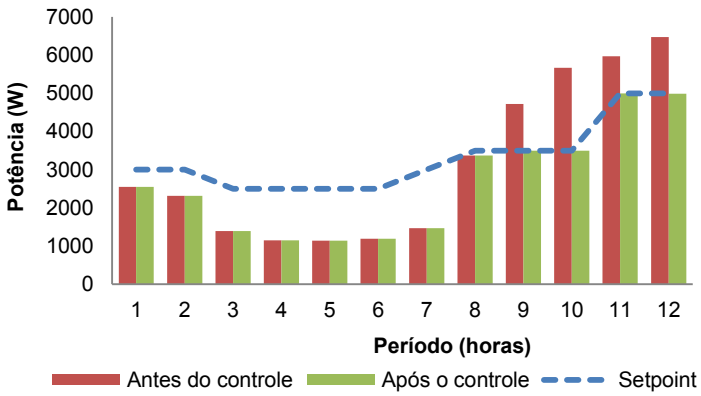


Figura 17 – Resultado do controle durante um intervalo de 12 horas
Fonte: FERNANDES et al. (2010)

Somente as cargas controláveis poderiam sofrer alterações pelo sistema, isto é, durante a execução do processe de otimização as cargas não controláveis mantêm o mesmo consumo sendo as cargas controláveis as verdadeiras responsáveis por igualar o consumo da instalação ao *set point* definido através de uma redução parcial ou total do consumo.

Durante os momentos onde o consumo total foi menor do que o ponto de operação definido pelo usuário, não ocorreu otimização e controle das cargas. Nos períodos de 9 a 12 fica evidente o processo de otimização e controle das cargas, visto que após o processo o consumo não ultrapassou o ponto de operação. Mesmo com a presença de carga fixas, ou não controláveis, houve uma economia considerável no consumo de energia elétrica.

Os resultados obtidos com o estudo demonstram a eficácia do sistema mantendo o consumo sempre dentro dos limites predefinidos. SUI et al. (2011) aponta que a eficiência energética é um dos principais objetivos do *demand response*.

Para a implementação do sistema SCADA foi utilizado um controlador lógico programável (CLP). No futuro um sistema semelhante poderá ser integrado ao próprio *smart meter*, tornando-se viável a maioria dos consumidores. Essa funcionalidade depende basicamente da integração, comunicação entre dispositivos e da padronização nos protocolos adotados para comunicação e transmissão de dados. Capacidade de processamento embarcado para tal controle não pode ser considerada como um problema crítico atualmente.

Atualmente o sistema desenvolvido sofreu atualizações e passou a utilizar uma RNA para obter melhores valores para os pesos definidos pelos usuários, levando em conta seu comportamento e contexto.

Através do projeto ELECON, foi possível uma parceria entre os grupos de pesquisa “LSISPOTI – Laboratório de Sistemas de Potência e Técnicas Inteligentes/UNESP Bauru” e “GECAD – Grupo de Investigação em Engenharia do Conhecimento e Apoio à Decisão/ISEP-IPP, Instituto Politécnico do Porto”. Tal parceria possibilitou o intercâmbio de conhecimentos, além de possibilitar conhecer os laboratórios utilizados pelo grupo de pesquisa do Porto, bem como os trabalhos desenvolvidos e atualmente em desenvolvimento.

Em trabalho conjunto, foi desenvolvido um circuito microcontrolado para monitoramento e controle de cargas atualmente simuladas pelo sistema do

laboratório LASIE. O circuito desenvolvido foi aplicado a um refrigerador e integrado ao sistema anteriormente desenvolvido, possibilitando a coleta de dados durante a utilização do refrigerador. Os resultados obtidos podem ser vistos em GOMES et al. (2014).

A Figura 18 apresenta os elementos do sistema atualmente implementado, com suas cargas, subdivisões destas cargas e os componentes necessários ao processo de simulação e otimização das cargas. Também é apresentado um diagrama do circuito desenvolvido para o controle das cargas.

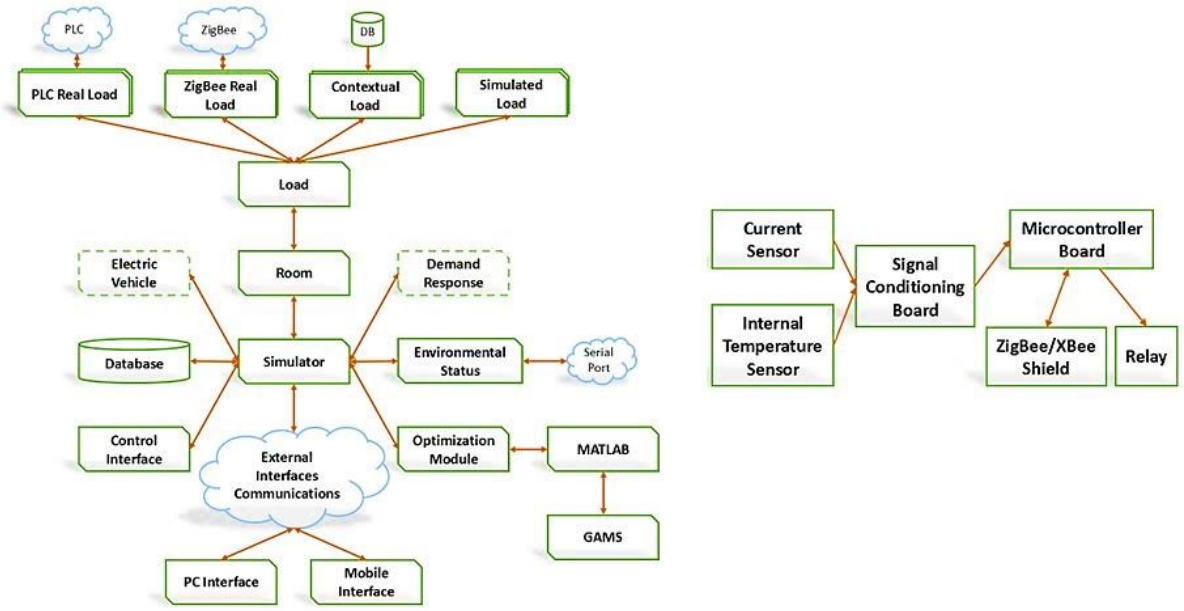


Figura 18 – À esquerda, diagrama geral do sistema, à direita, esquema do circuito de controle
Fonte: GOMES et al. (2014)

2.7 Considerações finais

Neste capítulo foram apresentados os principais conceitos e tecnologias relacionados às redes inteligentes e aos medidores inteligentes além dos benefícios relacionados à eficiência energética.

Foram apresentadas também algumas tendências futuras relacionadas às redes inteligentes e aos medidores inteligentes. Essa gama de novas possibilidades tende a crescer através da fundamentação, padronização e evolução das técnicas e tecnologias envolvidas. Sistemas híbridos mesclando as melhores características dos sistemas disponíveis atualmente e a utilização de técnicas inteligentes possuem grande potencial de crescimento e aplicação prática.

Através da pesquisa realizada com o grupo de consumidores ficou evidente o interesse em buscarem um comportamento mais eficiente, que reflita diretamente sobre os valores finais em suas contas de energia. Dados de consumo, preço da energia e histórico de consumo conjuntamente com interfaces simples e interativas mostram-se como grandes aliados nessa busca por melhores padrões de consumo.

Os projetos desenvolvidos na Coreia e Portugal, apesar de possuírem focos principais distintos, impactaram diretamente sobre a eficiência energética através do controle e minimização do consumo de energia elétrica. Ficaram evidentes os benefícios proporcionados pelas interfaces com o usuário que contenham informações claras e atualizadas, bem como a utilização de sistemas auxiliares inteligentes para o controle e automação das residências.

No capítulo a seguir é apresentado o desenvolvimento do *smart meter* proposto. As informações coletadas durante todo o levantamento bibliográfico auxiliaram na escolha das características técnicas, dos dados a serem coletados, processados e armazenados e também com relação à interface a ser a adotada, independente do seu uso final.

3 DESENVOLVIMENTO DO SMART METER PROPOSTO

Neste capítulo é apresentado o desenvolvimento de um *smart meter* de baixo custo que alie precisão nas medições com a capacidade de armazenar os dados coletados, permitindo um estudo posterior dos resultados. Além disso, deveria possuir uma estrutura versátil e adaptável, tornando-se uma alternativa para coleta de dados em diversas situações.

A terminologia *smart meter* foi adotada em função da quantidade de dados processados e disponibilizados aos usuários, a capacidade de armazenar as informações coletadas e a flexibilidade do dispositivo desenvolvido, principalmente quando relacionado aos medidores eletrônicos comumente utilizados em algumas unidades consumidoras. Entretanto ainda é um termo com significado bastante amplo, podendo ter significado diferente e ser relacionado a diferentes características de acordo com o fabricante ou contexto.

3.1 Motivação

Existem no mercado diversas opções de medidores eletrônicos de energia, entretanto eles tradicionalmente não possibilitam alterações de suas características dificultando sua utilização em algumas situações. Em muitos estudos, para se realizar uma profunda análise dos resultados, é necessário o acesso a uma grande diversidade de dados bem como conhecer o fluxo de processamento empregado.

Além dos medidores utilizados comercialmente, existem kit didáticos voltados ao desenvolvimento, possibilitando o conhecimento das técnicas de medição mais utilizadas, além das novas tecnologias disponíveis no mercado. TEXAS INSTRUMENTS (2013a) e MICROCHIP (2011) são alguns dos fabricantes de kits de desenvolvimento disponíveis no mercado. Tradicionalmente os fabricantes destes kits disponibilizam os códigos fonte, permitindo alterações de acordo com as necessidades do usuário e com as possibilidades do hardware envolvido. Entretanto ainda existem limitações quanto a alterações no hardware que podem dificultar ou impossibilitar expansões ou mesmo integrações com sistemas adicionais.

Os analisadores de qualidade de energia por sua vez são grandes aliados nos estudos realizados em laboratórios, principalmente devido a sua grande precisão e confiabilidade, entretanto o alto custo envolvido em sua aquisição por vezes pode desencorajar sua utilização em alguns ambientes e situações.

Em virtude da dificuldade de acesso aos kits de desenvolvimento e a necessidade de um equipamento que pudesse ser personalizado de acordo com a necessidade iniciou-se a pesquisa e desenvolvimento de um *smart meter* que possuísse precisão aliado a capacidade de coletar e armazenar dados úteis para análises posteriores, dados este relacionados ao consumo de energia e também a qualidade da energia elétrica.

O projeto apresentado dá continuidade a trabalhos anteriormente desenvolvidos. Tal continuidade permite um aperfeiçoamento das técnicas e tecnologias empregadas.

Em AMARAL (2012), foi desenvolvido um conceito de equipamento nomeado como “gerenciador de energia”, que englobava uma etapa embarcada responsável pela medição de algumas grandezas elétricas além de etapas de filtragem de linha e proteção contra distúrbios na rede elétrica. O projeto era baseado em um microcontrolador da família 8051. Devido a suas limitações foi necessária à utilização de um conversor analógico digital (A/D) externo. O modelo utilizado possuía apenas 8 bits de resolução. Entretanto, mesmo com as limitações do hardware empregado foram obtidos resultados dentro do esperado com relação às medições e sua precisão dentro da proposta do trabalho.

Posteriormente foi realizado um *upgrade* no circuito embarcado, substituindo-se o antigo microcontrolador pelo MSP430 desenvolvido pela *Texas Instruments*. Este upgrade teve como base principal a plataforma “*Launchpad Value Line*” devido a sua simplicidade, recursos oferecidos, baixo custo e facilidade de aquisição. A mudança de um microcontrolador CISC de 8 bits para um microcontrolador baseado na tecnologia RISC com 16 bits levou a um aumento considerável no desempenho do sistema. A utilização do conversor A/D interno de 10 bits resultou em um aumento teórico de até 4x na resolução das medidas realizadas. Em AMARAL et al. (2013) é abordado o desenvolvimento detalhado do *upgrade* realizado, bem como os resultados alcançados.

O *smart meter* possuía como características iniciais básicas a serem alcançadas; baixo custo em relação às ferramentas disponíveis no mercado,

precisão semelhante aos medidores de referência disponíveis no laboratório, medição *true* rms de tensão e corrente, medição da potência aparente, consumo acumulado em kVAh, além de armazenamento das formas de onda e dados processados em uma memória não volátil para posterior análise.

Devido a limitações iniciais de desenvolvimento, originalmente optou-se por não abordar a medição de potência ativa, consumo acumulado em kWh e também análises relacionadas qualidade da energia elétrica, como por exemplo, a medição da distorção harmônica total, ou *total harmonic distortion* (THD), de tensão e corrente.

3.2 O sistema embarcado desenvolvido

Para o desenvolvimento deste novo projeto optou-se por manter a utilização da linha MSP430, entretanto, foi adotada uma topologia multiprocessador permitindo a divisão das tarefas entre os mesmos além de contornar limitações relacionadas aos periféricos disponíveis em cada modelo.

A linha MSP430 tem sido amplamente utilizada no ambiente acadêmico e de desenvolvimento devido ao baixo custo de alguns kits de desenvolvimento, fornecimento de uma *Integrated Development Environment* (IDE) para desenvolvimento dos *firmwares* e por sua característica de baixo consumo (DUDACEK; VAVRICKA, 2007; GASPAR; SANTO; RIBEIRO, 2010).

Devido a sua característica de baixo consumo tem sido amplamente empregado em dispositivos móveis alimentados por baterias, principalmente quando a vida útil desta bateria deve ser a maior possível, como por exemplo, em dispositivos de sensoriamento remoto (HÖRMANN et al., 2010). Essa característica é aproveitada no desenvolvimento do medidor, minimizando o consumo de energia necessário para seu funcionamento.

Foram utilizados dois microcontroladores. O primeiro, um MSP430F2013 responsável pela amostragem dos sinais de tensão e corrente da rede elétrica. Este microcontrolador tem como diferencial possuir um conversor A/D do tipo sigma/delta de 16 bits com um *programmable gain amplifier* (PGA) integrado a cada canal, possibilitando a conversão de uma ampla gama de sinais sem perda de resolução

efetiva. As ondas amostradas são enviadas através da s*erial peripheral interface* (SPI) para o segundo microcontrolador, um MSP430G2955 que armazena temporariamente as formas de onda e realiza os processamentos necessários.

A seguir, na Figura 19, é apresentado um diagrama simplificado dos principais componentes do sistema embarcado.

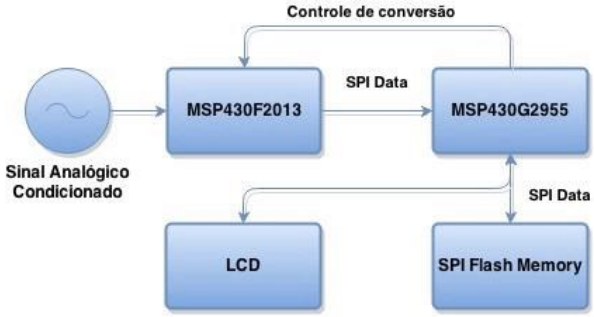


Figura 19 – Principais componentes do sistema embarcado
Fonte: Arquivo pessoal

O fluxo simplificado dos algoritmos empregados nos firmwares embarcados em cada microcontrolador pode ser visto na Figura 20.

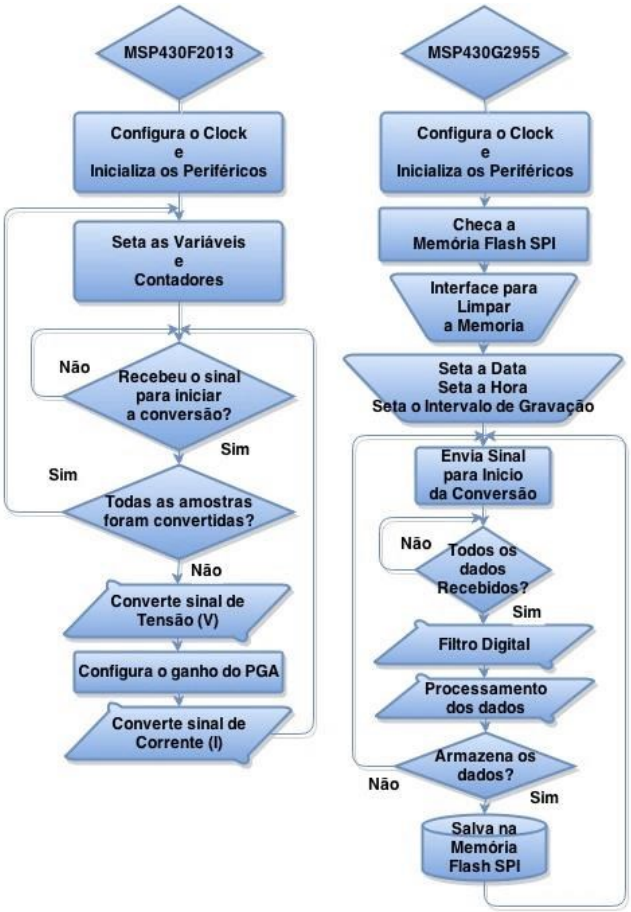


Figura 20 – Fluxograma dos códigos embarcados
Fonte: Arquivo pessoal

No MSP430F2013 após a configuração do *clock* interno e inicialização dos periféricos ocorre o *setup* de diversas variáveis com seus valores iniciais. Após esta etapa o sistema passa a aguardar por um sinal de início de conversão, enviado pelo MSP430G2955. Enquanto o total de amostras por canal não for atingido o programa é executado em loop.

A amostragem dos sinais é realizada a um *sample rate* de 3840 Hz por canal, totalizando 64 amostras com 16 bits de resolução para uma rede padrão de 60 Hz. Assim que todas as amostras tiverem sido coletadas o sistema passará a aguardar novamente pelo sinal de início de conversão.

Os canais são amostrados sequencialmente, gerando um pequeno deslocamento de fase entre o canal da tensão e o canal da corrente. Este deslocamento tem relação direta com a frequência de amostragem e com a frequência do sinal amostrado. Na atual forma de utilização não traz impactos consideráveis, em virtude da amostragem de apenas dois canais e também pelo fato deste sequenciamento ser determinístico, ou seja, possuir um intervalo preciso e conhecido. Em um projeto com mais canais sendo amostrados, essa defasagem deve ser analisada, estudando-se a possibilidade de adoção de hardware específico que possibilite a amostragem sincronizada de todos os canais simultaneamente.

Os passos iniciais do código embarcado no MSP430G2955 são iguais, configurando o *clock* e inicializando os periféricos. Sequencialmente é checada a presença da memória *flash* SPI responsável por armazenar os dados coletados, caso ela não for identificada o sistema não disponibilizará a opção de gravar os dados. Com a memória identificada é apresentada uma interface onde é possível apagar o conteúdo da memória *flash*, possibilitando a gravação dos novos dados. Após esta etapa são configurados os dados referentes à data, horário e intervalo de gravação entre os dados. Com o sistema totalmente configurado é enviado o sinal para que o MSP430F2013 inicie a conversão dos sinais analógicos. A cada conversão os valores são enviados através da interface SPI utilizando dois *bytes* para transferir os 16 bits de cada amostra. Após todos os bytes terem sido recebidos serão aplicados filtros digitais para minimizar o impacto dos ruídos internos oriundos do funcionamento do próprio microcontrolador e seu conversor A/D, essa etapa torna-se ainda mais importante para sinais de pequena amplitude, garantindo a integridade dos mesmos e o resultado das medições.

Para este propósito foi empregado um filtro de média móvel simples, ou *simple moving average filter*. O mesmo foi escolhido por ser amplamente citado na literatura devido ao seu desempenho computacional, facilidade de implementação, por não gerar defasagem entre o sinal de entrada e o de saída, e principalmente pelo comportamento com relação à atenuação de ruídos aleatórios (SMITH, 1999). A equação que descreve a implementação do filtro pode ser vista a seguir.

$$y[i] = \frac{1}{M}\sum_{j=0}^{M-1} x[i+j] \tag{1}$$

Onde: *x[ ]* é o sinal de entrada
y[ ] é o sinal de saída
M é o número de pontos da média móvel

Quanto maior a quantidade de pontos utilizados na média móvel, maior será a atenuação do ruído, entretanto, este aumento no número de pontos eleva a inércia de resposta, limitando sinais com variações dinâmicas muito grandes, conforme pode ser visto na Figura 21.

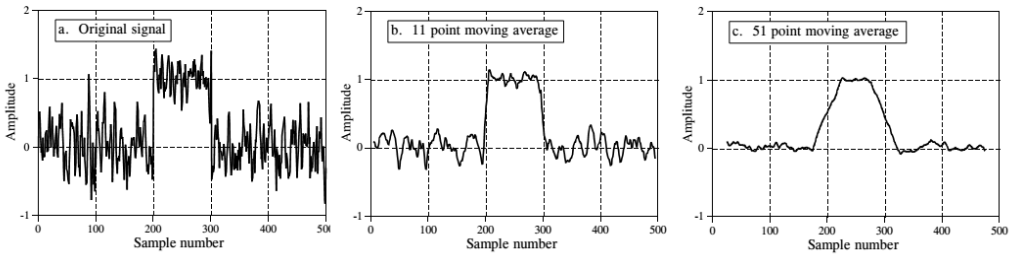


Figura 21 – Filtro de média móvel
Fonte: SMITH (1999)

Após a aplicação do filtro digital os sinais são então processador para obtenção dos valores de tensão, corrente, potência aparente e consumo acumulado.

As medições de tensão e corrente são realizadas através de algoritmos *true* rms, desta maneira, os resultados apresentados representam os valores reais, independente da forma das ondas, uma característica das mais importantes para um medidor de energia lidando com tensões e/ou corrente sob a incidência de distorção harmônica.

De acordo com o intervalo escolhido pelo usuário os dados coletados e processados serão periodicamente armazenados na memória *flash* até que atinja seu limite de armazenamento.

Um dos principais objetivos do *smart meter* desenvolvido foi possibilitar o armazenamento de todos os dados coletados e processados para análises

posteriores. Os dados processados são armazenados em uma memória *flash* SPI de 4 Mb. Essa capacidade de armazenamento possibilita 1535 registros completos. A memória pode ser substituída por outras da mesma linha com maior capacidade sem necessidade de grandes alterações no código. Durante a inicialização do sistema é verificada a presença da memória e qual seu modelo.

A placa com o circuito embarcado desenvolvido pode ser vista na Figura 22, seus principais componentes destacados através de retângulos identificados conforme a legenda.

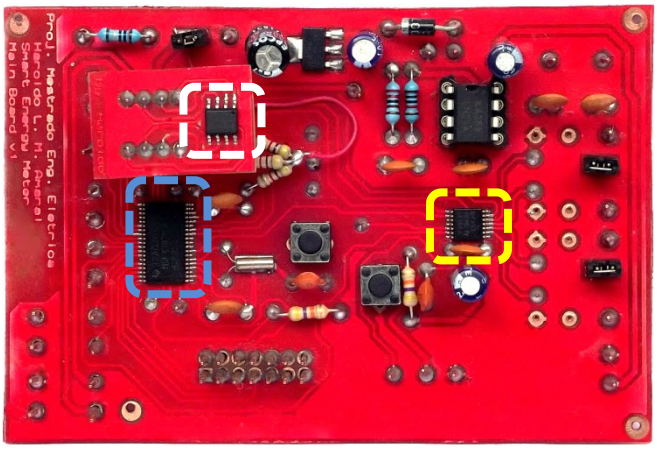


Figura 22 – “Main Board” com o MSP430F2013 (amarelo), MSP430G2955 (azul) e memória flash (branco)
Fonte: Arquivo pessoal

Durante a inicialização do sistema o usuário pode definir o intervalo entre o armazenamento dos dados além de configurar a data e hora do sistema.

Os dados processados são apresentados aos usuários através de um display de cristal líquido (LCD) colorido. Inicialmente optou-se por utilizar um display LCD monocromático de 84x48 *pixels* já disponível, facilitando o processo de desenvolvimento e testes. Como um dos objetivos era apresentar grande quantidade de informações em uma interface simples ao usuário, optou-se por substituir por um modelo maior como resolução de 320x240 *pixel* e colorido. Os resultados iniciais desta modificação podem ser vistos na Figura 23.



Figura 23 – Comparação entre os LCD's
Fonte: Arquivo pessoal

3.3 Particularidades dos algoritmos e otimização dos códigos

Apesar do ganho de desempenho com a mudança para a linha MSP430, a mesma tem foco no baixo consumo de energia e não no poder de processamento.

Para obter um melhor desempenho foram empregadas diversas técnicas focadas na programação de dispositivos embarcados. A linguagem de programação utilizada em todo o processo de programação dos microcontroladores foi o "C" utilizando-se o compilador *Code Composer Studio* fornecido pela *Texas Instruments*.

Uma das primeiras medidas em busca da otimização do código e melhoria no desempenho foi a não utilização de bibliotecas padrão presentes nos compiladores. As bibliotecas padrão normalmente são desenvolvidas para aplicações em computadores onde o poder de processamento, a capacidade de armazenamento e principalmente a quantidade de memória RAM não são problemas. Tradicionalmente os microcontroladores possuem baixo *clock* de funcionamento, pequena quantidade de memória flash ou outro tipo de memória não volátil para o armazenamento do código compilado e limitada quantidade de memória RAM. O principal gargalo para as bibliotecas padrão está relacionado à limitação de memória RAM. Uma biblioteca matemática como a "*math.h*" pode consumir toda a memória RAM disponível dependendo da função matemática empregada, em muitos casos não permitindo nem que o projeto seja compilado e executado.

3.3.1 Algoritmo RMS

Uma das principais características do *smart meter* desenvolvido é a capacidade de obter os valores rms de tensão e corrente. Garantindo que os resultados das medições estejam o mais próximo do valor real, independente da forma de onda. O valor eficaz pode ser obtido através da equação a seguir.

$$A_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_{0}^{T} a^2(t).dt} \tag{2}$$

Como citado anteriormente, os valores de tensão e corrente são obtidos através de um algoritmo *true* rms. Neste tipo de algoritmo as amostras referentes às formas de onda coletas são integralizadas para obtenção de seu valor eficaz, conforme pode ser visto na equação a seguir.

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N}\sum x^2} \tag{3}$$

Onde: *N* é o número de amostras
x é o valor discreto de cada amostra

Como a biblioteca matemática padrão não podia ser utilizada fez-se necessário a utilização de um algoritmo mais eficiente para o cálculo da raiz quadrada e obtenção do valor eficaz das medidas de tensão e corrente.

No projeto desenvolvido em AMARAL (2012), utilizou-se um algoritmo baseado no método de Newton onde através de sucessivas aproximações é possível se obter as raízes de uma equação numérica. Entretanto, existem métodos alternativos com maior eficiência computacional, enquadrando-se melhor nas características e limitações do sistema desenvolvido.

Optou-se por utilizar um algoritmo baseado no método binário, um método desenvolvido especificamente para cálculo de raízes utilizando-se a base binária. Por trabalhar com os números em seu formato nativo – base binária – o desempenho é muito maior quando comparado a outros métodos (CRENSHAW, 2000). Entretanto existe uma limitação, os números binários podem lidar somente

com números inteiros, tornando impossível de se obter resultados precisos, algo necessário ao projeto.

Para obterem-se resultados do tipo *float* com duas casas após a vírgula aplicou-se uma modificação no algoritmo. O valor de entrada é multiplicado por uma constante que possua raiz quadrada de valor inteiro e conhecido. Após o cálculo da raiz quadrada pelo método binário, o resultado é salvo em uma variável do tipo *float* e então é dividida pela raiz quadrada da constante utilizada como multiplicado no início da operação. Essa estratégia aumentou o desempenho bem como garantiu a precisão necessária aos resultados durante o desenvolvimento inicial.

3.3.2 Operação em ponto fixo

Durante o desenvolvimento do projeto novos algoritmos foram implementados, permitindo o processamento de novas informações importantes para analise do consumo e qualidade da energia elétrica. Neste ponto a utilização de variáveis *float* e *double* tornou-se um grande limitador do sistema.

A utilização destas variáveis em microcontroladores sem hardware específico, ou *floating-point unit* (FPU), leva a uma emulação deste processamento via software. Apesar desta emulação ser inserida transparentemente pelo compilador, o processo envolve maior gasto de memória e principalmente um grande número de ciclos de processamento para execução de funções básicas como a soma, a subtração, a multiplicação e a divisão. Além disso, a execução das funções trigonométricas nativas da biblioteca padrão, utilizando variáveis *float* ou *double* no microcontrolador escolhido, somaria um grande tempo de processamento.

Para os novos algoritmos utilizados no cálculo de THD e também no filtro IIR utilizado para o cálculo do fator de deslocamento (FD), ou $\cos\varphi$, seria necessário à utilização da biblioteca "*math.h*" com suas funções "*sin( )*" e "*cos( )*". Sua utilização elevaria o consumo de memória e limitaria a capacidade de processamento do sistema como um todo.

Durante a etapa de avaliação dos algoritmos implementou-se uma *discret Fourier transform* (DFT) utilizando variáveis de ponto flutuante emulado e as funções

da biblioteca matemática. O processamento de 32 harmônicas de um ciclo da rede levou aproximadamente 13 segundos para ser realizado. Tal custo computacional inviabilizaria este tipo de analise.

Para contornar este problema optou-se por utilizar variáveis de ponto fixo ao invés de ponto flutuante. Tal implementação foi realizada através da biblioteca "*IQmathLib*" disponibilizada pela *Texas Instruments*. Além de possibilitar a execução do código consideravelmente mais rápida, permite menor consumo de energia quando comparada ao código equivalente utilizando ponto flutuante (TEXAS INSTRUMENTS, 2014). O baixo consumo de energia em dispositivos embarcados é foco tanto dos fabricantes, através do emprego de novas tecnologias de fabricação, como dos desenvolvedores e projetistas, através da utilização de códigos mais eficientes e que utilizem ao máximo as tecnologias disponíveis.

A biblioteca de ponto fixo utiliza variáveis nativas do tipo inteiro para armazenar a porção inteira dos números e também sua porção decimal. A forma de armazenamento dos dados do tipo "IQ" é exemplificada na Tabela II a seguir. A tabela completa, bem como outras características da biblioteca, pode ser acessada na íntegra em TEXAS INSTRUMENTS (2014).

Tabela II – IqmathLib: tipos de variáveis

	Bits		Faixa de valores		
Tipo	**Inteiro**	**Decimal**	**Mínimo**	**Máximo**	**Resolução**
_iq30	2	30	-2	1,999999999	0,000000001
_iq29	3	29	-4	3,999999998	0,000000002
_iq20	12	20	-2.048	2.047,999999046	0,000000954
_iq10	22	10	-2.097.152	2.097.151,999023440	0,000976563
_iq5	27	5	-67.108.864	67.108.863,968750000	0,031250000

Fonte: TEXAS INSTRUMENTS (2014)

A escolha do tipo de variável deve levar em consideração os limites dos valores envolvidos, bem como a precisão necessária ao processamento. Quanto maior o número de bits utilizados para a parte decimal, maior a precisão dos cálculos.

Para efeito de comparação foram realizados três testes. No primeiro teste comparou-se o algoritmo utilizando ponto flutuante e a raiz quadrada baseada no algoritmo binário adaptado, com o algoritmo utilizando a biblioteca IQ. Foram medidas as quantidades de execuções do *loop* principal no intervalo de 1 segundo. Este *loop* continha o cálculo de tensão rms, corrente rms e potência aparente. Para

o código utilizando ponto flutuante foram obtidas 22 execuções completas, para o código utilizando IQ, 26 execuções completas. Um aumento de 18,18% na velocidade de execução. Aparentemente um pequeno aumento, entretanto deve-se considerar que o código utilizando a biblioteca IQ realiza a conversão de todos os valores nativos para a variável IQ selecionada. Mesmo com todas as conversões o processamento mostrou-se mais eficiente.

No segundo teste realizou-se uma comparação de desempenho entre o algoritmo de raiz quadrada da biblioteca padrão, o algoritmo binário adaptado e o algoritmo da biblioteca IQ. Para todos os casos realizou-se o cálculo da raiz quadrada do número 65535. O algoritmo padrão da biblioteca padrão levou 2,724 ms para ser executado, o algoritmo binário adaptado 862 µs e o algoritmo da biblioteca IQ 160 µs. O algoritmo binário adaptado foi 3,16 vezes mais rápido que a biblioteca padrão, e o baseado na biblioteca IQ foi 17,02 vezes mais rápido que a biblioteca padrão.

No terceiro teste o algoritmo de DFT anteriormente implementado, foi modificado para utilizar a biblioteca "*IQmathLib*" e suas funções matemáticas. A execução do mesmo processamento diminuiu de aproximadamente 13 segundos para menos de 1 segundo.

Estes resultados evidenciam o ganho de desempenho obtido a partir da utilização da biblioteca de ponto fixo. Com a eficiência comprovada, todos os algoritmos necessários passaram a utilizar ponto fixo.

A partir da utilização da biblioteca de ponto fixo tornou-se possível à implementação prática de novos algoritmos para o cálculo do THD, FD e FP.

3.3.3 Cálculo do THD

Apesar do algoritmo empregado para o cálculo da DFT funcionar perfeitamente, este ainda não possuía o desempenho esperado. Também não se fazia necessário o cálculo de diversas harmônicas, já que é possível realizar o cálculo do THD através do valor eficaz da onda e do valor de sua fundamental.

Neste ponto foi implementado um algoritmo para cálculo da fundamental com base no algoritmo de Goertzel. Essa é uma técnica de processamento digital de sinais que possibilita uma avaliação eficiente de termos individuais de uma DFT, necessitando de menor capacidade de processamento (BANKS, 2002).

Tradicionalmente o cálculo do THD é realizado através da seguinte equação:

$$THD_x = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} x_h^2}}{x_1} \tag{4}$$

Onde: THD_x é a distorção harmônica total
h é a ordem da harmônica
x_1 é o valor eficaz da fundamental

Como o algoritmo implementado calcula apenas o valor da frequência fundamental, utilizou-se a seguinte equação para o cálculo do THD:

$$THD_x = \frac{\sqrt{{x_t}^2 - {x_1}^2}}{x_1} \tag{5}$$

Onde: THD_x é a distorção harmônica total
x_t é o valor eficaz da onda
x_1 é o valor eficaz da fundamental

3.3.4 Cálculo FD e FP

Uma necessidade bastante comum relacionada ao processamento digital de sinais está relacionada a isolar uma estreita banda de frequências de um sinal (SMITH, 1999). Para o cálculo do FD faz-se necessário isolar a componente fundamental dos sinais de tensão e corrente, para então poder calcular o deslocamento entre elas. Para este fim utilizou-se um filtro *band pass*, ou, passa banda do tipo *infinite impulse response* (IIR).

A equação recursiva genérica é apresentada a seguir:

$$\begin{aligned} y[n] = a_0 x[n] + a_1 x[n-1] + a_2 x[n-2] + \cdots \\ + b_1 y[n-1] + b_2 y[n-2] + \cdots \end{aligned} \tag{6}$$

Onde: $x[\,]$ é o sinal de entrada
$Y[\,]$ é o sinal de saída

Os coeficientes “a” e “b” para o filtro passa banda podem ser calculados através das equações a seguir (SMITH, 1999):

$$a_0 = 1 - K \tag{7}$$

$$a_1 = 2(K - R).\cos(2\pi f) \tag{8}$$

$$a_2 = R^2 - K \tag{9}$$

$$b_1 = 2R.\cos(2\pi f) \tag{10}$$

$$b_2 = -R^2 \tag{11}$$

Onde:

$$K = \frac{1 - 2R.\cos(2\pi f) + R^2}{2 - 2.\cos(2\pi f)} \tag{12}$$

$$R = 1 - 3.BW \tag{13}$$

Onde: *f* é a frequência central
BW é a largura de banda, variando de 0 a 0,5 da frequência de amostragem

A Figura 24 apresenta o comportamento do filtro implementado durante o desenvolvimento. Destacado em vermelho, uma forma de onda simulada com 25% de THD de terceira harmônica, em verde, a saída do filtro. Nota-se que o resultado da onda de saída não é uma onda senoidal perfeita e este comportamento pode ser explicado pela grande distorção na forma de entrada – assemelhando-se a uma forma de onda quadrada. Entretanto este resultado mostrou-se eficiente para o cálculo do FD.

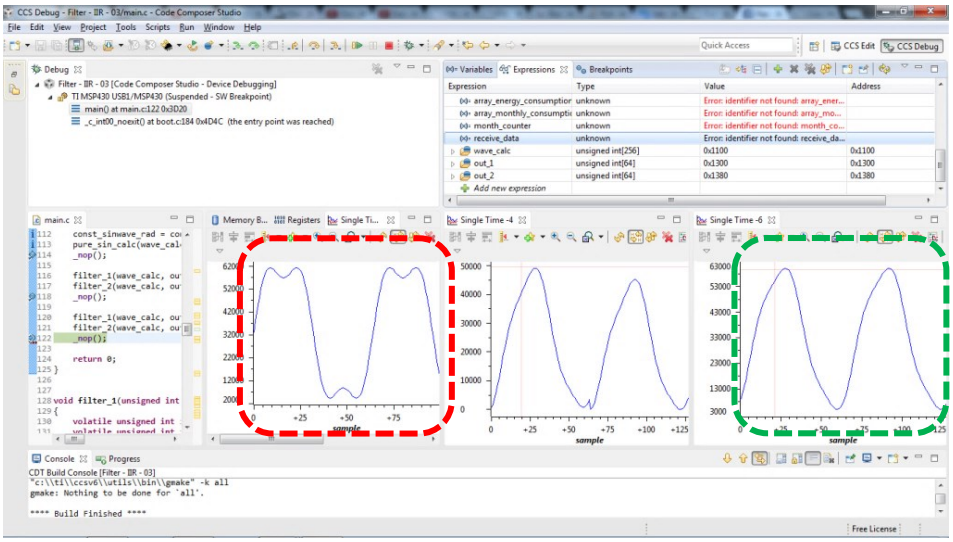


Figura 24 – Teste do filtro passa banda IIR
Fonte: Arquivo pessoal

Quando as cargas conectadas ao sistema são lineares e a tensão tem característica puramente senoidal o FP pode ser calculado a partir da seguinte equação:

$$FP = \cos\varphi = \frac{P}{S} \tag{14}$$

Onde: *cosφ* é o fator de deslocamento
P é a potência ativa
S é a potência aparente

Tradicionalmente, potências ativas, reativas e aparentes são relacionadas através do triângulo de potência, como apresentado na Figura 25.

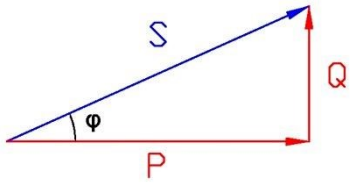


Figura 25 – Triângulo de potência
Fonte: QUINTOARMÓNICOES (2008)

Na presença de distorção harmônica de tensão e/ou corrente a formulação anteriormente apresentada não é mais válida. O cálculo do FP é realizado através da equação (BORGONOVO, 2001):

$$FP = \cos\varphi \,.\, \frac{(1 + THD_p)}{\sqrt{1 + THD_i{}^2} + \sqrt{1 + THD_v{}^2}} \tag{15}$$

Onde: *cosφ* é o fator de deslocamento entre as fundamentais
THD_p é a taxa distorção harmônica referente a potência ativa, conforme a Eq. 15
THD_i é o índice de distorção harmônica de corrente
THD_v é o índice de distorção harmônica de tensão

$$THD_p = \sum_{n=2}^{\infty} \frac{V_n * I_n * \cos\varphi_n}{V_1 * I_1 * \cos\varphi_1} \tag{16}$$

Onde: V_n é o valor de cada harmônica de tensão
V_1 é o valor de tensão da fundamental
I_n é o valor de cada harmônica de corrente
I_1 é o valor de corrente da fundamental
$\cos\varphi_n$ é o deslocamento para cada harmônica
$\cos\varphi_1$ é o deslocamento entre as fundamentais

Seus resultados são válidos tanto para ondas puramente senoidais como para ondas com incidência de distorção harmônica.

Considerando como nulo o THD de tensão a equação pode ser reescrita da seguinte maneira:

$$FP = \frac{\cos \varphi_1}{\sqrt{1 + THD_i{}^2}} \tag{17}$$

Onde: $cos\varphi_1$ é o fator de deslocamento entre as fundamentais
THD_i é o índice de distorção harmônica de corrente

3.3.5 Cálculo das potências

A presença dos harmônicos impossibilita a utilização da teoria tradicional e do triângulo de potência. Nesta nova realidade surge o conceito do tetraedro de potência, conforme a Figura 26.

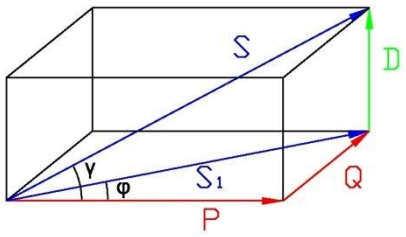


Figura 26 – Tetraedro de potência
Fonte: QUINTOARMÓNICOES (2008)

A potência aparente do sistema pode ser calculada através de:

$$S = V_{RMS} * I_{RMS} \tag{18}$$

O IEEE propôs através da norma 1459 novas definições (SUHETT, 2008). A potência ativa é calculada através de:

$$P = P_1 + P_H = V_1 * I_1 * \cos \varphi_1 + \sum_{n=2}^{\infty} V_n * I_n * \cos \varphi_n \tag{19}$$

Onde: P_1 é a potência ativa da fundamental
P_H é a potência ativa das harmônicas

Considerando a tensão da rede como uma onda senoidal pura pode-se simplificar a equação. Neste ponto, as definições de potência ativa propostas pelo IEEE e por Budeanu se assemelham:

$$P = V * I_1 * \cos \varphi_1 \tag{20}$$

Onde: *V* é a tensão eficaz

A mesma simplificação pode ser aplicada para a potência reativa:

$$Q = V * I_1 * \sin \varphi_1 \tag{21}$$

Através do tetraedro de potência é possível se obter a potência de distorção harmônica:

$$D = \sqrt{S^2 - P^2 - Q^2} \tag{22}$$

Onde: *D* é a potência de distorção harmônica
S é a potência aparente
P é a potência ativa
Q é a potência reativa

3.3.6 Armazenamento dos dados na memória flash

Um dos requisitos do *smart meter* é a capacidade de armazenar os dados coletados e processados, e para este propósito utilizou-se uma memória *flash* externa que utiliza o padrão SPI de comunicação. Ao se trabalhar com variáveis alocadas na memória interna do microcontrolador, o compilador realiza muitas ações transparentes ao usuário com relação ao endereçamento de memória de cada variável, ou mesmo em operações envolvendo a movimentação de valores de uma variável para outra – cópia de valores.

Os protocolos mais comuns utilizados para transmissão serial de dados como o *universal synchronous/asynchronous receiver/transmitter* (USART), i*nter-integrated circuit* (I2C) e SPI, de maneira geral transmitem basicamente bytes, ou conjuntos de oito *bits*. Essa característica pode dificultar o processo de transmissão

de variáveis com tamanho maior do que um byte. A transmissão de variáveis do tipo *float* ou *double* encaixa-se nesta limitação.

Todos os dados são salvos na memória flash em seus formatos originais, ou seja, ocupam o mesmo tamanho e possuem a mesma sequência binária do dado originalmente armazenado na memória RAM do microcontrolador. Especificamente para as variáveis nos formatos *float* e *double* foram desenvolvidas duas funções que utilizam operações de ponteiros para referenciar o endereço de memória da variável em questão, para depois transmitir todos os bytes referentes a variável, sendo 4 bytes no caso de variáveis *float* e 8 bytes no caso de variáveis *double*. Outras duas funções complementares realizam o trabalho inverso, durante a leitura dos dados armazenados na memória flash externa. Os bytes são lidos na memória flash, e através da operação de ponteiros são salvos nos endereços referentes à variável desejada, dentro da memória RAM.

Uma maneira alternativa que poderia ser abordada é salvar os resultados como caracteres em padrão *American Standard Code for Information Interchange* (ASCII), entretanto ocasionaria um elevado desperdício de memória visto que seria necessário um byte para cada caractere ASCII. Números demasiadamente pequenos ou grandes ocupariam grandes porções da memória. O armazenamento no tamanho original da variável garante a padronização no consumo de memória e uma melhor otimização da memória disponível.

3.3.7 Relógio de tempo real

O algoritmo responsável pelo armazenamento das informações coletadas e processadas depende de uma base de tempo para seu funcionamento. Para este fim utilizou-se um *real time clock* (RTC).

Tradicionalmente o RTC é implementado através de um circuito dedicado via componente externo, que depois de programado gerencia automaticamente o horário e da data do sistema. Para evitar o acréscimo de componentes externos, optou-se por utilizar um RTC via *software*, baseado nos periféricos internos do microcontrolador e um algoritmo disponível em TEXAS INSTRUMENTS (2011). O

algoritmo utiliza um cristal oscilador de 32.768 Hz e interrupções do *timer* interno para formação da base de tempo e controle do RTC.

3.4 Condicionamento dos sinais

Os sinais analógicos envolvidos na medição necessitam ser condicionados a níveis adequados para que se enquadrem nas características técnicas do conversor A/D empregado. Tanto sinais de tensão como de corrente necessitam passar por este processo.

A tensão da rede necessitava ser atenuada de maneira que se adequasse ao limite de 1,2 V_{pp} do conversor A/D. Este procedimento pode ser realizado através de transformadores de tensão, transdutores de efeito hall ou através de divisores resistivos.

Para este procedimento, foi utilizado um simples divisor resistivo. Além de ser um procedimento simples e barato, o processo não introduz artefatos como ruídos ou distorção na forma de onda do sinal original, como pode acontecer em outros métodos.

Um transformador abaixador de tensão de baixo custo, como os tradicionalmente utilizados em fontes de alimentação, poderia interferir diretamente na forma de onda disponibilizada em sua saída devido à qualidade dos materiais empregados em sua construção, conforme pode ser visto na Figura 27. Já o transdutor por Efeito *Hall* tradicionalmente possui um alto custo, tornando-o pouco atrativo para o projeto. O principal benefício da utilização destes transdutores está relacionado à isolação galvânica oferecida pelos mesmos.

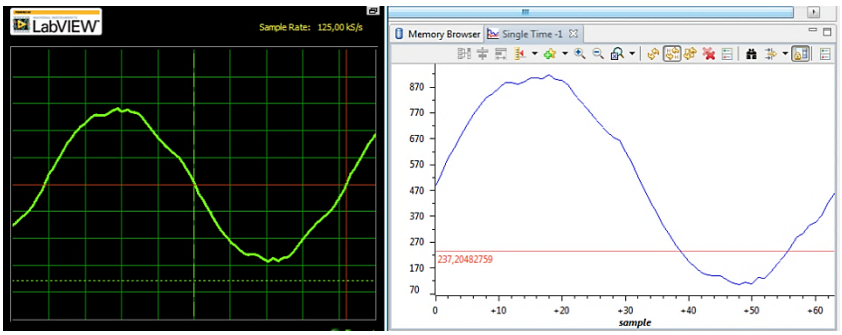


Figura 27 – Distorção na saída do transformador abaixador testado
Fonte: AMARAL et al. (2013)

A medição de corrente, por sua vez, pode ser realizada basicamente através de transformadores de corrente, transdutores de efeito hall ou através de resistores *shunt*. O transformador de corrente é muito utilizado quando existe a necessidade de se realizar uma medida de maneira não invasiva, entretanto, além de ser um componente relativamente caro, traz consigo um comportamento indesejado decorrente de suas características intrínsecas. Cargas indutivas ou capacitivas podem apresentar grandes erros por deslocamento de fase, e este problema tende a piorar com a diminuição do fator potência (FP) (TEXAS INSTRUMENTS, 2001). O transdutor de efeito hall, assim como o transformador de corrente oferece ótima linearidade e isolação galvânica, mas novamente sofre com seu valor elevado.

Nos projetos anteriormente desenvolvidos em AMARAL (2012) e AMARAL et al. (2013) foram utilizados transdutores de efeito hall para medição da corrente e notou-se a presença de ruído de fundo intrínseco ao componente utilizado. O nível de ruído afetava diretamente o processo de medição, o que dificultaria ou inviabilizaria medições de pequenas correntes sem afetar a forma da onda e os resultados das medições.

Optou-se por utilizar o resistor *shunt*. Neste método a corrente é medida pela da queda de tensão resultante do fluxo de corrente através do resistor *shunt*. O resistor empregado possui limite de dissipação de 3 W e sua resistência é de 10 mΩ ±1%.

Como um dos objetivos é a utilização do *smart meter* em residências para coletar dados e avaliar o comportamento dos consumidores, é necessário que a medição da corrente se ajuste a uma ampla faixa de valores. Com base nas características técnicas do resistor *shunt* empregado, uma corrente teórica de 65 A_{rms} levaria a uma dissipação acima de 42 W sobre o resistor, danificando-o, oferecendo riscos aos usuários e dissipando energia demasiadamente. Para evitar este comportamento foram utilizados cinco resistores *shunt* em paralelo. Essa medida possibilitou um limite teórico de 86 A_{rms} (em regime senoidal) sem que se ultrapasse o limite de dissipação de cada resistor shunt.

Para o limite máximo teórico de 86 A_{rms} seriam dissipados 3 W em cada um dos cinco resistores shunt, totalizando 15 W de dissipação, energia convertida em calor. Entretanto, de acordo com as medições realizadas, durante a maior parte do dia o consumo normal de uma residência varia entre 5 A_{rms} e 10 A_{rms}. Para correntes de 5 A_{rms} a dissipação total não excede 50 mW, e para 10 A_{rms} não excede 200 mW.

Os documentos TEXAS INSTRUMENTS (2012) e TEXAS INSTRUMENTS (2013b) abordam os transdutores anteriormente citados, sua forma de utilização nos medidores eletrônicos, circuitos envolvidos e também sobre os algoritmos utilizados na programação dos microcontroladores.

Tanto os sinais analógicos de tensão como corrente são condicionados para que se adequem a cada escala desejada. Os valores foram limitados para 172 V_{rms} e 72 A_{rms}, ambos em regime senoidal. Estes valores foram escolhidos de maneira empírica em virtude da tensão da rede local – 127 V_{rms} – e através de medições em uma residência, extrapolando os valores máximos normalmente alcançados pelo conjunto de cargas residenciais. Estes valores podem facilmente ser alterados através da substituição de alguns componentes discretos na placa de condicionamento. Característica que torna o projeto bastante versátil, podendo ser adequado para outras escalas de tensão e corrente de acordo com a necessidade. A placa contendo o circuito analógico de condicionamento dos sinais pode ser visto na Figura 28.

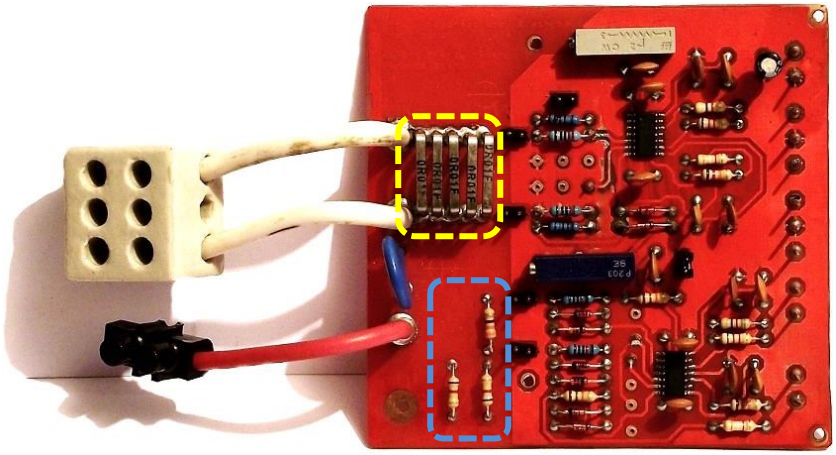


Figura 28 – “Analog Board”, Resistores Shunt (amarelo) e Divisor Resistivo (azul)
Fonte: Arquivo pessoal

Depois de amplificados, os sinais de tensão passam por um filtro ativo da topologia *Sallen-key* de 4ª ordem com a frequência de corte (FC) em 1920 Hz, evitando os efeitos do *aliasing* durante a conversão ou mesmo a incidência de ruídos de alta frequência. Inicialmente o filtro foi simulado através do *software MultSim* da *National Instruments*, e sua resposta em magnitude e fase é apresentada na Figura 29.

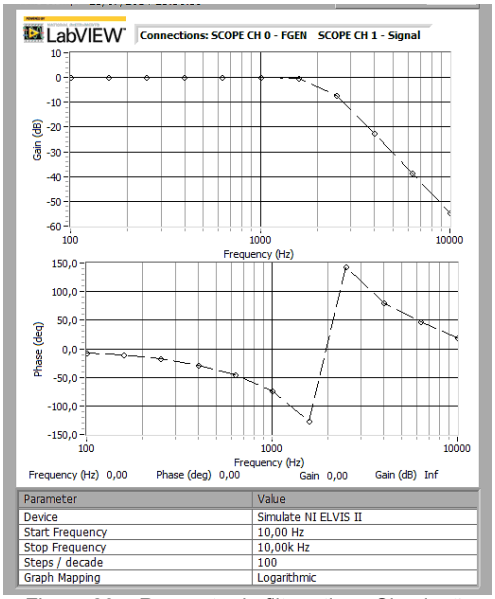


Figura 29 – Resposta do filtro ativo - Simulação
Fonte: Arquivo pessoal

Através da interface *Analog Discovery* desenvolvida pela *Digilent*, realizou-se o teste de *bode plot* do filtro implementado no circuito de condicionamento, permitindo comparar os resultados obtidos entre a simulação e o circuito real, conforme pode ser visto na Figura 30. Os resultados da simulação computação e do teste com o circuito real são bastante próximos, como esperado. O circuito real apresenta pequena diferença com relação à frequência de corte e também com sua resposta em altas frequências, ambas relacionadas à tolerância dos componentes discretos empregados.

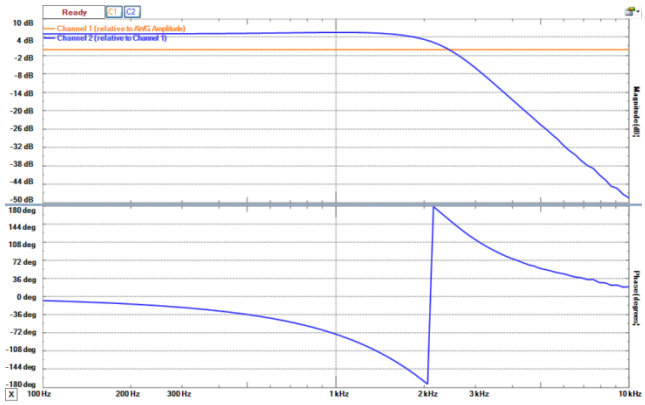


Figura 30 – Resposta do filtro ativo – Placa de condicionamento
Fonte: Arquivo pessoal

A mesma etapa de filtragem é aplicada aos dois canais responsáveis pela amostragem dos sinais de tensão e corrente. Após a etapa de filtragem, os sinais estão devidamente condicionados para serem amostrados pelo conversor A/D sigma/delta de 16 bits.

O sistema completo desenvolvido pode ser visto na Figura 31.

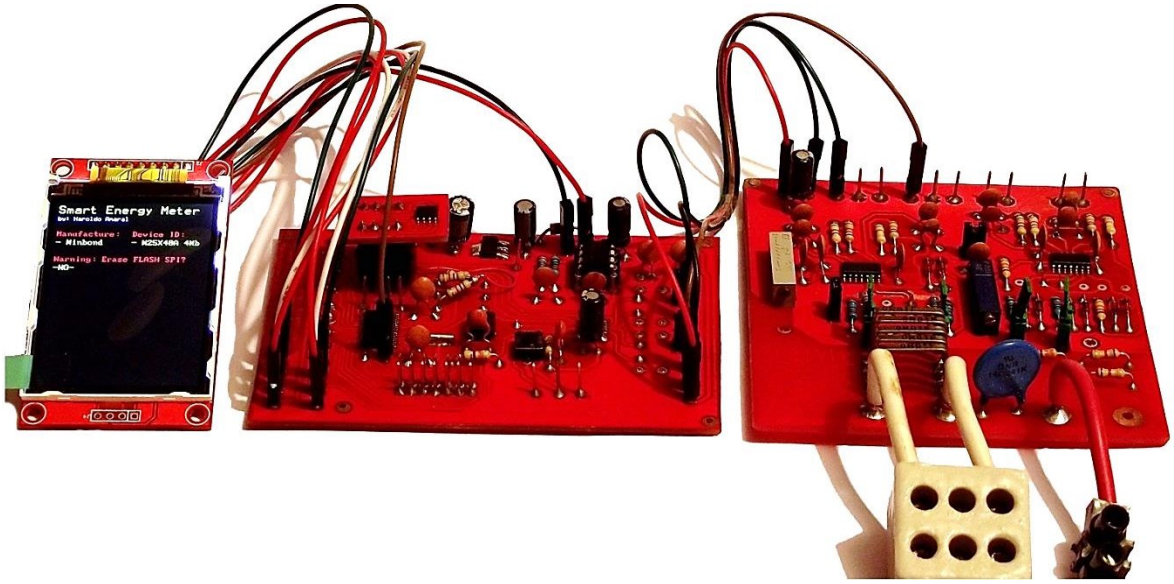


Figura 31 – Sistema desenvolvido
Fonte: Arquivo pessoal

3.5 Dados coletados pelo smart meter desenvolvido

No início deste capítulo são listadas as características básicas que o sistema desenvolvido deveria alcançar. Durante o desenvolvimento do projeto diversas mudanças e testes foram realizados. Com o acesso a novas técnicas e algoritmos foi possível expandir as capacidades iniciais, adicionando novas funcionalidades ao *smart meter* desenvolvido.

Os seguintes dados são processados e armazenados pelo medidor:

- Forma de onda da tensão da rede;
- Forma de onda da corrente da rede;
- Tensão rms;
- Corrente rms;
- THD de tensão;
- THD de corrente;
- Fator de deslocamento;
- Fator potência;
- Potência aparente;
- Potência ativa;
- Potência reativa;
- Potência de distorção harmônica;
- Consumo acumulado (VAh);
- Consumo acumulado (Wh); e
- Data e hora da amostragem

Através da interface no LCD ficam visíveis as formas de onda de tensão e corrente, valores de tensão rms, corrente rms, potência aparente, potência ativa, consumo acumulado em kVAh e kWh, THD de tensão e corrente, FD e FP, além da data, hora e quantidade de amostras armazenadas até o momento atual. A Figura 32 mostra a interface com o usuário apresentada no LCD durante a inicialização do sistema e durante o funcionamento normal.

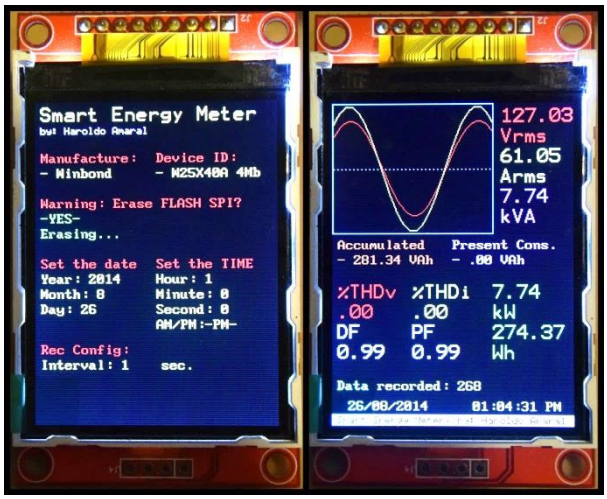


Figura 32 – Interface no LCD. a) Na esquerda – programação durante a inicialização, b) Na direita – dados durante a utilização
Fonte: Arquivo pessoal

Os dados armazenados na memória *flash* podem posteriormente ser baixados para o computador através de um circuito auxiliar que utiliza a conexão serial/USB para salvar os dados em uma planilha. A Figura 33 apresenta o protótipo do software desenvolvido para o *download* dos dados armazenados.



Figura 33 – Interface do software desenvolvido
Fonte: Arquivo pessoal

O armazenamento em um arquivo no padrão *Microsoft Excel* viabiliza uma rápida análise do comportamento de consumo durante o período de coleta dos dados. Possibilita também processamentos mais profundos e complexos através de softwares como o Matlab ou Scilab.

3.6 Resultados obtidos

Para o processo de calibração do *smart meter* foram utilizados um analisador de qualidade de energia como referência para as medições de tensão e corrente e uma interface de aquisição de dados para análise e comparação dos índices de THD de tensão e corrente.

Os valores das medições para cada grupo de cargas foram comparados com os do medidor de referência possibilitando calibrar os limites de tensão e corrente, além das constantes de correção para cada nível de ganho do PGA, garantindo a precisão das medidas em toda a faixa de medição.

Após o processo de calibração, ambos os medidores foram conectados simultaneamente a diversas cargas com comportamentos diferentes, entre cargas lineares e não lineares, visando avaliar as medidas e os erros referentes. O resultado deste teste pode ser visto na Figura 34 e Figura 35, onde o eixo vertical esquerdos apresenta os valores de tensão e corrente, o eixo vertical direito o respectivo erro das medidas, o eixo horizontal o total de amostras.

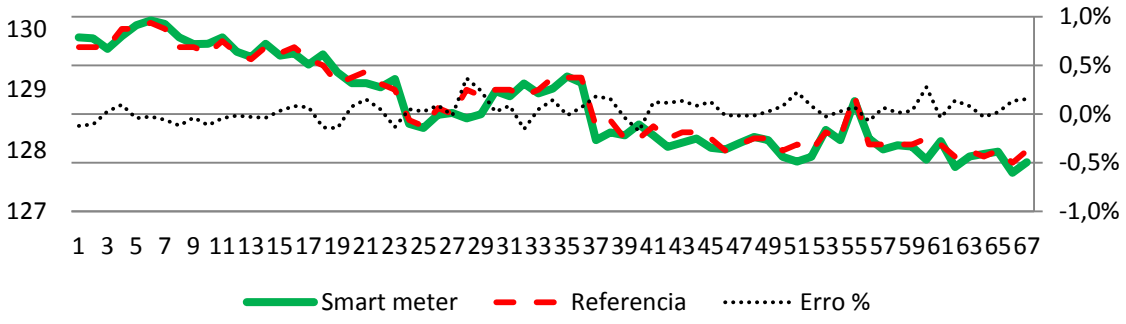


Figura 34 – Comparação dentro do laboratório: medição de tensão
Fonte: Arquivo pessoal

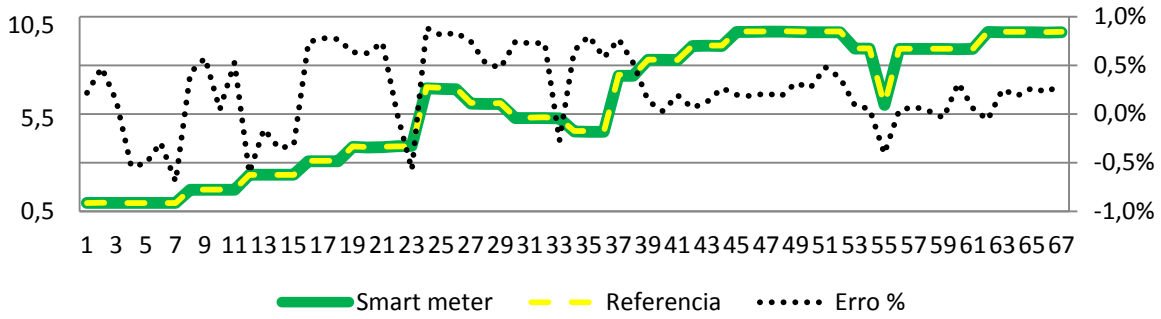


Figura 35 – Comparação dentro do laboratório: medição de corrente
Fonte: Arquivo pessoal

O teste evidenciou a precisão das medidas. Os erros referentes à medição de tensão não excederam a margem de ±0,4% e os de corrente ±0,9%. O índice de erro de corrente pouco acima do erro de tensão tem relação com a margem de variação dinâmica dos sinais. Os sinais de tensão mantiveram-se com baixa variação, situando-se entre 126 V_{rms} e 131 V_{rms}. Já os sinais de corrente variaram entre os limites mínimos e máximos da garra de medição do equipamento de referência – de 0 A_{rms} a 10 A_{rms}, além de excursionar diversos níveis de ganho do *smart meter* desenvolvido.

Para um novo teste o medidor foi instalado em uma sala pelo período de aproximadamente quatro dias e programado para armazenar os dados a cada três minutos. Os resultados são apresentados na Figura 36.

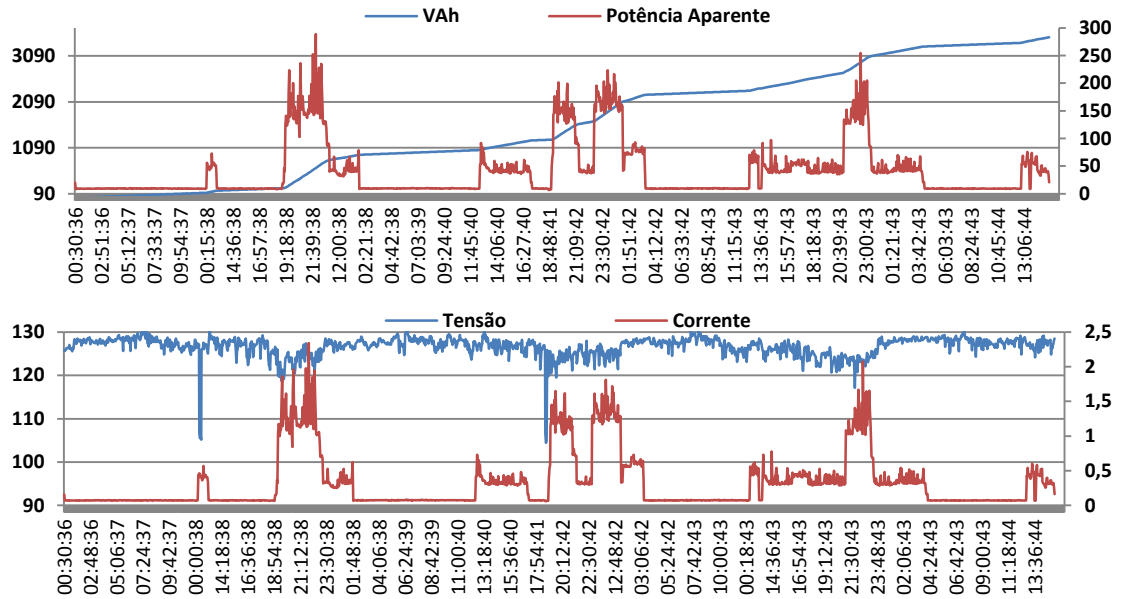


Figura 36 – Resultados da medição realizada com o smart meter. a) Consumo acumulado e potência aparente instantânea; b) tensão e corrente
Fonte: Arquivo pessoal

O gráfico superior apresenta o consumo em VAh e a potência aparente durante o período de coleta dos dados. O gráfico inferior apresenta os níveis de tensão e corrente durante o processo.

As cargas predominantes na sala onde o equipamento foi instalado são computadores e equipamentos de áudio. É possível identificar através dos gráficos os momentos onde os equipamentos estão em *stand-by* ou quando estão em uso. O computador possui um comportamento menos variável quando comparado aos equipamentos de áudio que dependem basicamente do sinal que estão processando e amplificando.

Para a realização do terceiro teste o smart meter foi instalado no quadro de medição de uma residência. Foram realizadas medições abordando diversas escalas com cargas de comportamentos variados disponíveis na residência, permitindo verificar a precisão das medidas realizadas pelo *smart meter* desenvolvido. Na Figura 37 são apresentados os resultados das medições de tensão e na Figura 38 os resultados das medições de corrente.

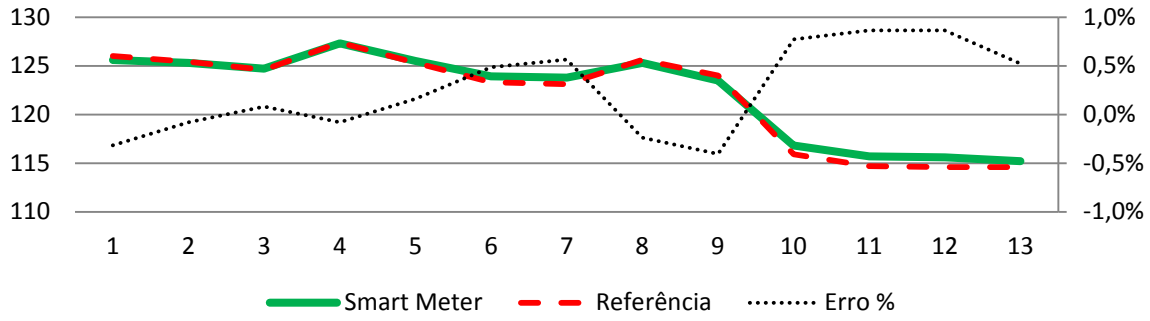


Figura 37 – Teste em ambiente não controlado: medição de tensão
Fonte: Arquivo pessoal

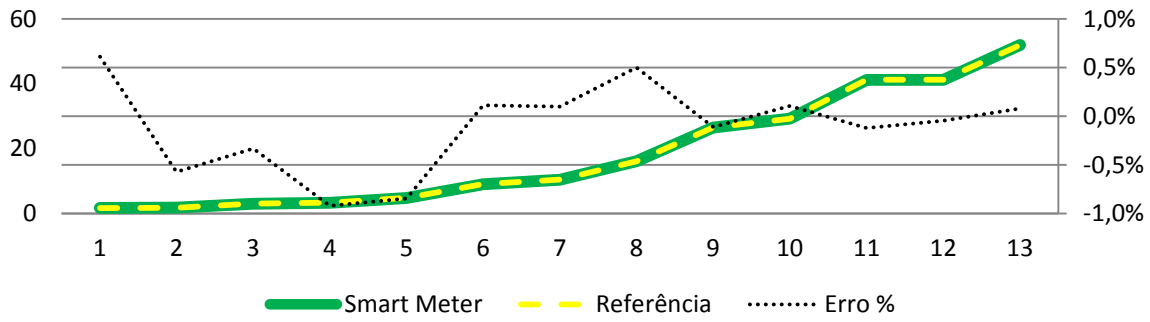


Figura 38 – Teste em ambiente não controlado: medição de corrente
Fonte: Arquivo pessoal

Neste teste o *smart meter* estava sofrendo influências do ambiente não controlado, tornando-o mais próximo das condições reais de uso. Durante este teste

avaliou-se um erro relacionado à medição de tensão acima do teste realizado em laboratório, entretanto ainda sim não excedendo os limites de ±0,9%. Este comportamento pode ser explicado pela ação da temperatura sobre os resistores utilizados no divisor resistivo. O comportamento do erro para medição de corrente permaneceu semelhante ao teste realizado no laboratório.

Com o medidor ainda instalado no quadro de medição realizou-se a coleta de dados configurando-se o intervalo de 7 segundos entre cada armazenamento de dados, totalizando aproximadamente três horas e meia de coleta de dados. A Figura 39 contém os resultados do teste.

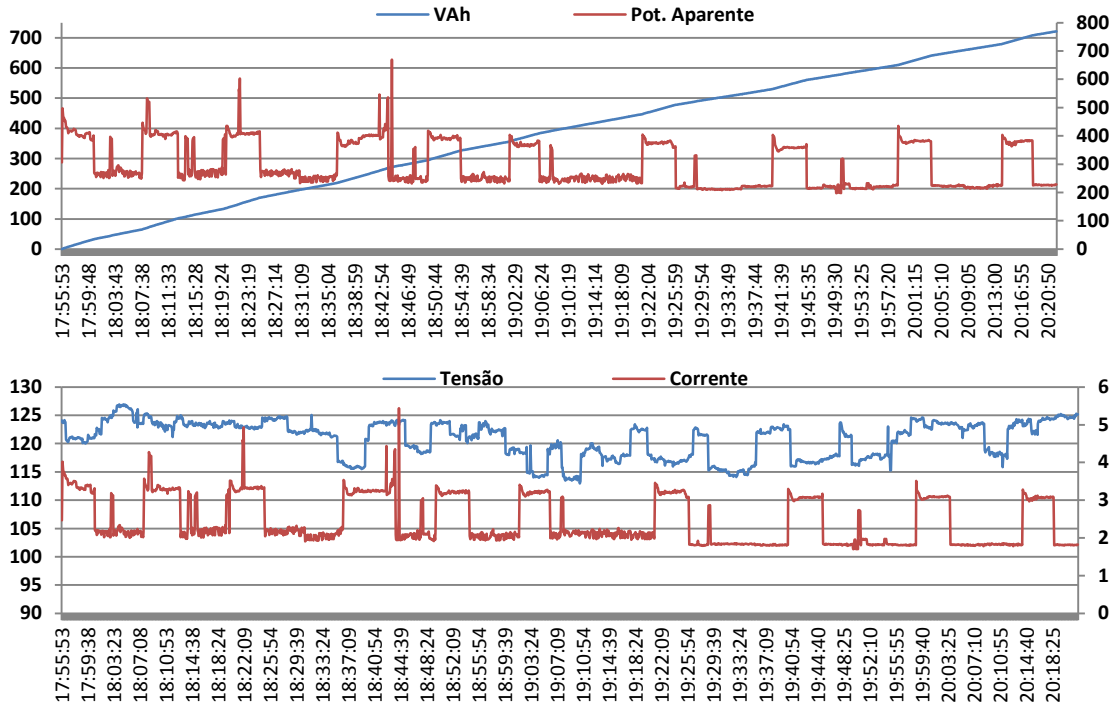


Figura 39 – Resultados da medição realizada com o smart meter. a) Consumo acumulado e potência aparente instantânea; b) tensão e corrente
Fonte: Arquivo pessoal

Uma nova coleta de dados foi realizada alterando-se o intervalo entre as amostragens para 3 minutos, totalizando aproximadamente oitenta e sete horas de coletas ou três dias e meio. A Figura 40 a contém os resultados do teste.

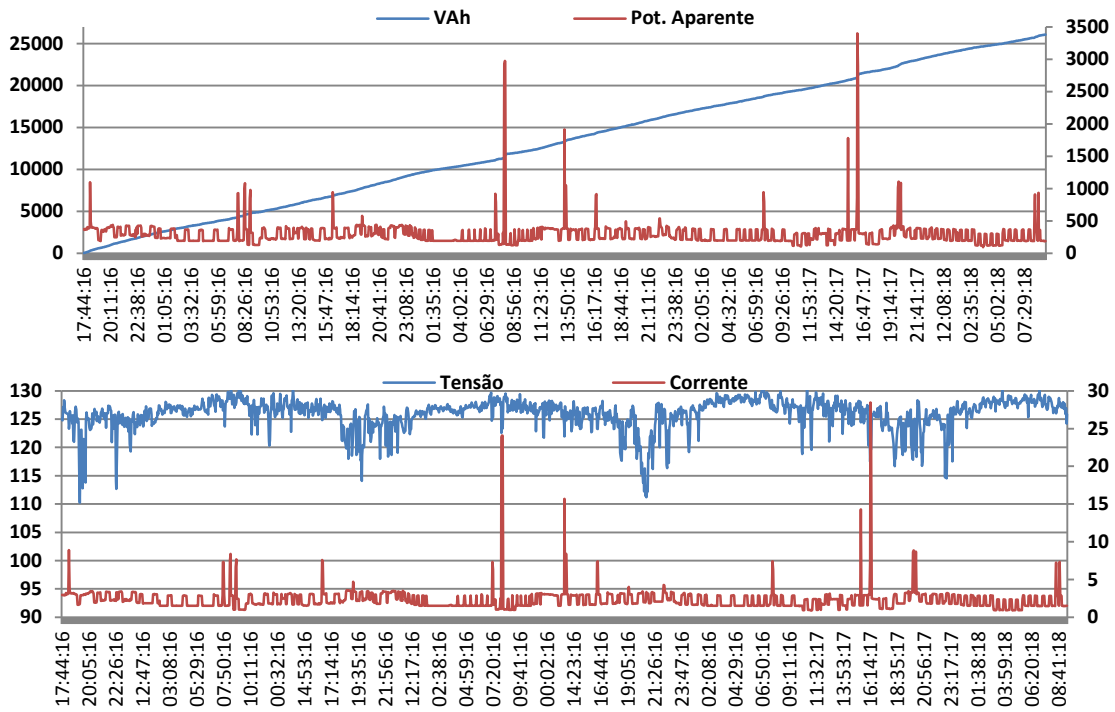


Figura 40 – Resultados da medição realizada com o smart meter. a) Consumo acumulado e potência aparente instantânea; b) tensão e corrente
Fonte: Arquivo pessoal

Um dos maiores fatores a dificultarem o desenvolvimento de um *smart meter* está relacionado à ampla faixa de medidas de corrente, como pode ser visto no gráfico anterior. Durante grande parte do dia, a potência dos eletroeletrônicos utilizados em uma residência tradicional é relativamente pequena, resultando em uma corrente total com baixo valor, geralmente na faixa de 3 a 5 amperes, sendo inferior a 1 ampere em alguns momentos. No outro extremo, existe a necessidade de conseguir realizar medições de grandes correntes acima dos 40 amperes, por exemplo, quando um chuveiro e um forno de micro-ondas estão sendo utilizados simultaneamente em uma rede 127 V.

Essa necessidade de medição em uma ampla faixa de correntes justifica a utilização do PGA, garantindo um melhor aproveitamento de toda a faixa dinâmica do conversor ADC, ao mesmo tempo, evita que o sinal exceda os limites de tensão do conversor ADC. A utilização do PGA levou a um processo mais complexo e criterioso de calibração do medidor que foi executado em todas as escalas de ganho, garantindo a exatidão e precisão das medidas.

A verificação dos algoritmos utilizados para os cálculos de THD, FD e FP foi realizada em duas etapas diferentes. Na primeira etapa foram geradas formas de onda dentro do próprio software utilizando as funções seno e cosseno. Como a

amplitude, índice de THD e deslocamento de fase eram escolhidos e conhecidos, foi possível avaliar a resposta dos algoritmos com relação aos valores teóricos. Foram realizados diversos testes com formas de onda com amplitudes relativas a 0,83 V_p e 0,5 V_p, índices de THD variando entre 25% de terceira harmônica até 29% com harmônicas de terceira, quinta e sétima ordem, e também com deslocamentos de fase de 30, 45 e 60 graus.

Os resultados obtidos nesta primeira etapa apontaram erros máximos da ordem de ±0,07% para o valor rms, ± 0,08% para o THD, ±0,56% para FD e FP.

Na segunda etapa, os mesmo sinais anteriormente simulados, foram gerados através do gerador de sinais arbitrários da interface myDAQ da *National Instruments*, e os resultados foram comparados com os valores teóricos. Os resultados obtidos apontaram ±0,34% para o valor rms, para o THD obteve-se um erro máximo de ±1,43%, entretanto o erro médio situa-se dentro da faixa de ±1%, para o FD erro máximo de ±0,80% e para o FP erro máximo de ±0,74%.

O aumento no erro entre as duas etapas tem relação com a mudança de um sinal ideal gerado pelo software, com um sinal real sofrendo ação dos circuitos associados e suas não linearidades. Entretanto, o erro médio dos algoritmos manteve-se abaixo de ±0,5%. O resultado completo dos testes está disponível no Apêndice I e Apêndice II.

O algoritmo que realiza o cálculo do THD possui uma limitação, não conseguindo detectar índices inferiores a 3%. Este comportamento tem relação com a precisão das variáveis de ponto fixo utilizadas no processamento. Entretanto essa limitação não trouxe impacto significativo sobre cálculo do FP visto que índices tão baixos não terão influencia significativa sobre o cálculo do FP.

Com todos os algoritmos testados e calibrados foram executados mais alguns testes. O *smart meter* foi novamente instalado na mesma sala, entretanto o intervalo adotado entre os registros foi de 1 segundo. Na Figura 41 estão os gráficos de tensão e corrente, na Figura 42 os gráficos de consumo acumulado em VAh e Wh e na Figura 43 os gráficos com as potências relacionadas, FD e FP.

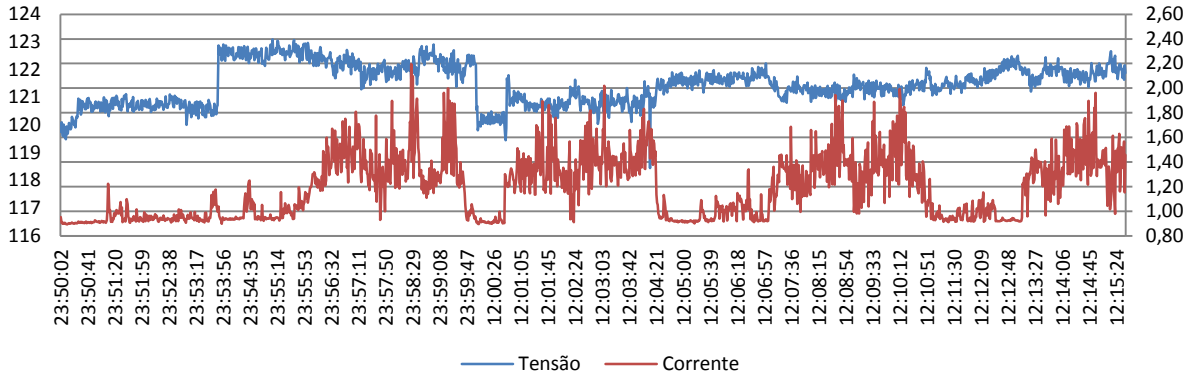


Figura 41 – Tensão: eixo esquerdo; Corrente: eixo direito
Fonte: Arquivo pessoal

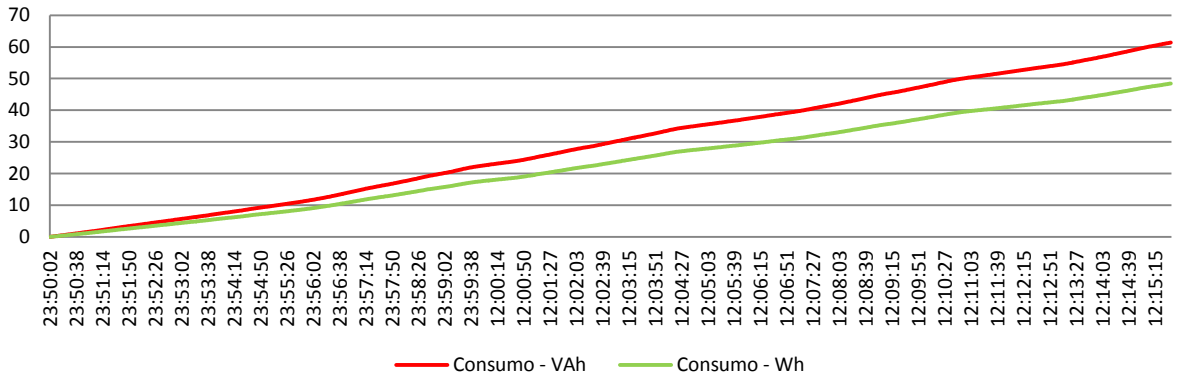


Figura 42 – Acumulado em VAh e Wh
Fonte: Arquivo pessoal

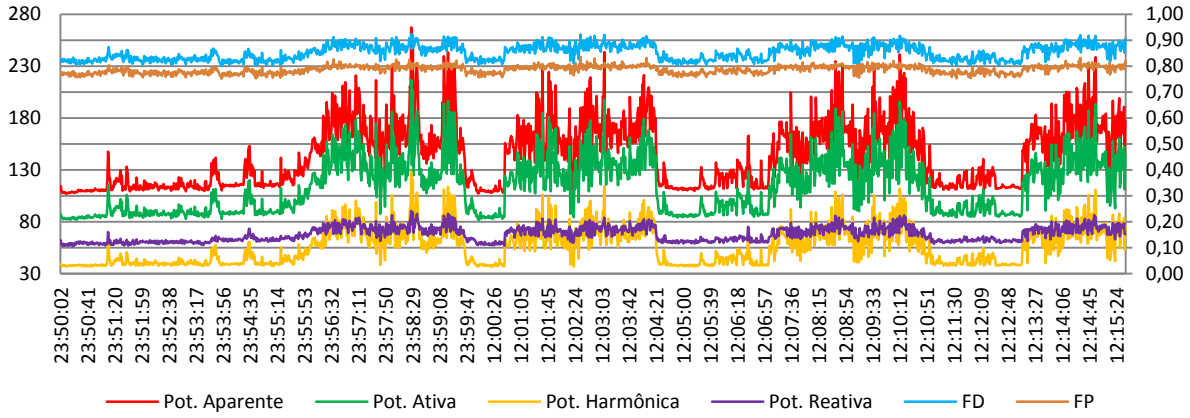


Figura 43 – Potências: eixo esquerdo; FD e FP: eixo direito
Fonte: Arquivo pessoal

Os dados disponibilizados possibilitam o estudo do comportamento de consumo de um equipamento conectado ao smart meter desenvolvido, ou mesmo de uma unidade consumidora. Estes dados coletados podem ser empregados com diversas finalidades, não tendo sua utilização restrita para fins de tarifação.

Uma nova coleta de dados foi realizada com o medidor conectado ao quadro de medição da residência, com registros realizados em intervalos de 1 segundo. Os resultados são apresentados na Figura 44, Figura 45 e Figura 46.

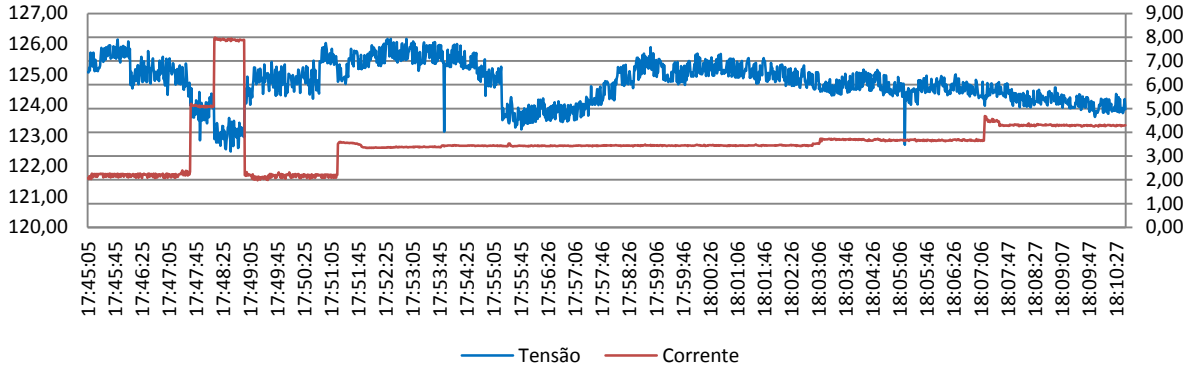


Figura 44 – Tensão: eixo esquerdo; Corrente: eixo direito
Fonte: Arquivo pessoal

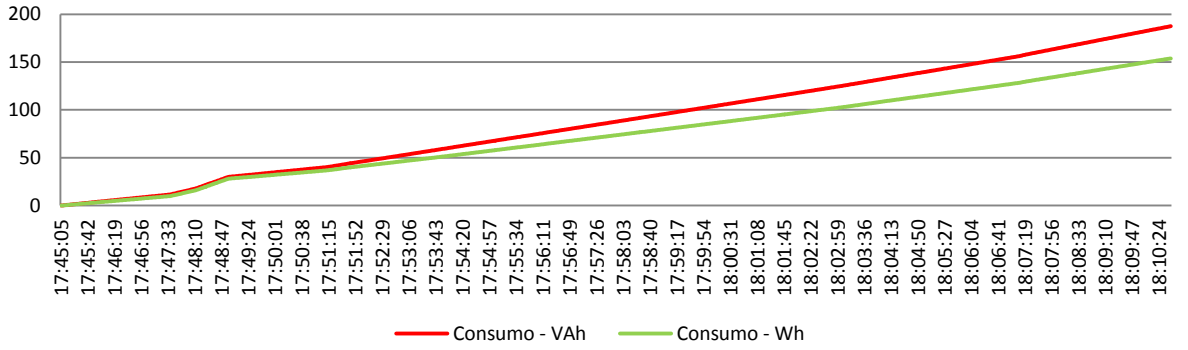


Figura 45 – Acumulado em VAh e Wh
Fonte: Arquivo pessoal

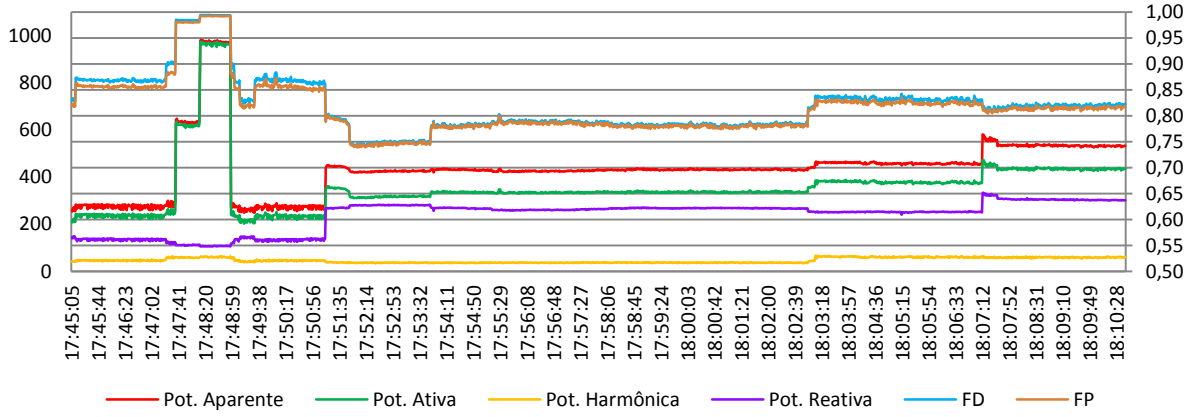


Figura 46 – Potências: eixo esquerdo; FD e FP: eixo direito
Fonte: Arquivo pessoal

Os gráficos apresentados evidenciam características dos equipamentos conectados a rede. É possível, por exemplo, avaliar o efeito das harmônicas sobre o FP. Na figura anterior, nos intervalor entre 18:03:18 e 18:07:12 ocorre uma

diminuição na potência reativa, em compensação ocorre uma elevação da potência harmônica. Tal aumento se relaciona com a queda do FP em relação do FD.

3.7 Custo estimado do medidor desenvolvido

Um dos objetivos apontados no início do projeto tinha relação com o custo do *smart meter* desenvolvido.

A Tabela V, no Apêndice III, contém o valor dos componentes utilizados para a confecção do protótipo do medidor.

O custo estimado foi de $40,25 dólares. Coloca-se como custo estimado, visto que os microcontroladores foram obtidos como amostras para desenvolvimento através da *Texas Instruments*. Não foi levado em consideração o tempo de desenvolvimento, ferramentas já disponíveis no laboratório como gravador/*debugger*, instrumentos para calibração/testes e insumos utilizados para confecção das placas de circuito impresso. Os valores são apresentados em Dólar por tratar-se de uma moeda de referência.

3.8 Considerações finais

Neste capítulo foi apresentado o desenvolvimento do *smart meter* proposto. Os objetivos iniciais foram alcançados e o protótipo desenvolvido mostrou-se uma ferramenta útil para utilização tanto em laboratório como em testes *in-loco* devido a sua flexibilidade.

No capítulo a seguir são apresentadas as principais conclusões e também possibilidades de trabalhos futuros dando continuidade a este trabalho desenvolvido.

4 CONCLUSÕES

4.1 Conclusões gerais

O *smart meter* desenvolvido obteve os resultados esperados, alcançando precisão nas medidas semelhantes ao medidor de referência utilizado.

A escolha dos microcontroladores da linha MSP430 utilizados teve como base o prévio conhecimento da arquitetura, bem como os custos e facilidade de obtenção de amostras para o desenvolvimento. Ambos os modelos escolhidos não possuíam uma FPU para realização dos cálculos matemáticos utilizando variáveis *float*, nem unidade de multiplicador por hardware responsável por acelerar multiplicações de números inteiros.

Durante o desenvolvimento, com a introdução de novas funções como o cálculo do THD, tornou-se evidente a necessidade de uma FPU para acelerar os cálculos necessários. Neste ponto a utilização de um microcontrolador com capacidades voltadas ao processamento digital de sinais trariam grandes benefícios expandindo as possibilidades. A adoção de ponto fixo possibilitou a introdução de novas funcionalidades mantendo o desempenho necessário ao sistema.

Ainda dentro dos objetivos foi possível aliar flexibilidade ao circuito e ao código desenvolvido, possibilitando alterar a faixa de medição para aplicações específicas, principalmente para medições onde a corrente máxima medida será inferior a do projeto. Desta maneira é possível adequar o medidor para testes com pequenas cargas sem que ocorra perda de precisão das medidas realizadas.

A capacidade de controle automático do ganho através do PGA interno do conversor ADC trouxe um diferencial frente ao medidor de referencia utilizado, onde as escalas de medição devem ser previamente selecionadas. Desta maneira, evita-se que os valores medidos ultrapassem o limite da escala escolhida, saturando as leituras do dispositivo.

Devido à flexibilidade do projeto existe a possibilidade de adição de novos hardwares, possibilitando, por exemplo, conexão sem fio, via PLC, ou mesmo o controle de cargas externas. O sistema desenvolvido tem como foco instalações

monofásicas, entretanto, através de alterações no hardware e software é possível adequar o sistema para medições em sistemas bifásicos ou trifásicos.

Os dados salvos mostraram-se muito úteis para análise do comportamento de um equipamento ou consumidor e também para analisar o estado da rede durante um intervalo de tempo.

Como as formas de onda são armazenadas, estes dados podem ser manipuladas em ambiente computacional para análises mais complexas, como por exemplo, envolvendo a decomposição das ondas de tensão e corrente em suas respectivas harmônicas através de uma *Fast Fourier Transform* (FFT). Os dados coletados também podem ser utilizados em estudos com redes neurais artificiais (RNA) que buscam classificar automaticamente as cargas de uma instalação através dos traços de consumo observados e características das formas de onda de tensão e corrente, como em WEISS et al. (2012).

Dados provenientes de diversos consumidores possibilitam o estudo e formação de curvas de carga de grupos específicos, tornando processos de estimação das cargas na rede, expansão ou mesmo estudos sobre carregamento da rede mais realistas e precisos.

Existe ainda a possibilidade de comparação das medições realizadas pelos medidores eletromecânicos e eletrônicos tradicionais quando afetados por distúrbios a distorção harmônica de tensão ou principalmente de corrente.

Este trabalho também apresentou os conceitos envolvendo as redes inteligentes e os medidores inteligentes, bem como características relacionadas a essas tecnologias e os benefícios verificados de sua implantação.

Os estudos demonstram o potencial de eficiência decorrente destas novas tecnologias, principalmente quando aliada com sua capacidade de coleta e disponibilização de informações da rede em tempo real, facilitando o processo de controle por parte de consumidores e concessionárias.

4.2 Trabalhos futuros

Para trabalhos futuros existe a possibilidade de atualizações e melhorias no *smart meter* desenvolvido. O microcontrolador responsável pela conversão dos

sinais pode ser substituído por modelos com *analog front end* (AFE) específicos para medição de energia ou mesmo substituindo por um AFE externo, facilitando o desenvolvimento e possibilitando melhorias relacionadas à precisão do conversor A/D, sincronismo, *sample rate*, quantidade de canais e minimização dos erros envolvidos.

Uma memória SD padrão elevaria a capacidade de armazenamento, tornando-se alvo para uma futura atualização.

Para aumentar a capacidade de processamento existe a possibilidade de substituição do microcontrolador principal responsável pelo processamento dos dados por um microcontrolador com núcleo ARM Cortex M4f que além da alta capacidade de processamento possui uma máquina de ponto flutuante simples nativa, aumentando ainda mais o desempenho e precisão dos cálculos envolvidos.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. **RESOLUÇÃO NORMATIVA Nº 502.** 2012.

AMARAL, H. L. M. D. **INTERFERÊNCIAS ELETROMAGNÉTICAS, TRANSITÓRIOS E QUALIDADE DA ENERGIA: impacto nos equipamentos eletromédicos e desenvolvimento de um gerenciador de energia**. 2012. 100 f.. (Tecnólogo). Tecnologia em Sistemas Biomédicos, Faculdade de Tecnologia de Bauru, Bauru/SP.

_____. Medição de Energia Elétrica e Eficiência Energética. 2014. Disponível em: < http://abre.ai/pesquisa_mestrado >.

AMARAL, H. L. M. D. et al. ESTUDO E DESENVOLVIMENTO DE UM GERENCIADOR DE ENERGIA PARA EQUIPAMENTOS ELETROMÉDICOS – BENEFÍCIO DA REALIZAÇÃO DE UPGRADES. **Revista Fatecnológica**, n. 6, p. 15, 2013. ISSN 1980-8526. Disponível em: < http://issuu.com/fatec-jahu/docs/revista_n___6_-2013 >.

ANAS, M. et al. **Minimizing Electricity Theft Using Smart Meters in AMI**. Proceedings of the 2012 Seventh International Conference on P2P, Parallel, Grid, Cloud and Internet Computing: IEEE Computer Society**:** 176-182 p. 2012.

ARIF, A. et al. **Experimental study and design of smart energy meter for the smart grid**. Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC), 2013 International**:** 515-520 p. 2013.

ASSIMQUESEFAZ. Como ler o medidor de energia da sua casa. 2014. Disponível em: < http://assimquefaz.com/ver-tutorial/como-ler-o-medidor-de-energia-da-sua-casa >.

AZIZ, A. F. A. et al. Artificial Intelligent Meter development based on Advanced Metering Infrastructure technology. **Renewable and Sustainable Energy Reviews,** v. 27, p. 191-197, 2013. ISSN 1364-0321. Disponível em: < http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032113004425 >.

BANKS, K. The Goertzel Algorithm. 2002. Disponível em: < http://www.embedded.com/design/configurable-systems/4024443/The-Goertzel-Algorithm >.

BORGONOVO, D. **MODELAGEM E CONTROLE DE RETIFICADORES PWM TRIFÁSICOS EMPREGANDO A TRANSFORMAÇÃO DE PARK**. 2001. 162 f.. (Mestrado). Eng. Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina

CANAVAGH, R.; HOWAT, J. **Finding Common Ground Between Consumer and Environmental Advocates**. Electricity Policy.com 2012.

CEMAT. Aneel aprova regras para instalação de medidores eletrônicos. 2012. Disponível em: < http://www.cemat.com.br/noticias/aneel-aprova-regras-para-instalacao-de-medidores-eletronicos/ >. Acesso em: Dez. 2014.

CEMIG. P&D 327 - Sistema interativo integrado ami / tv digital. 2009. Disponível em: < http://www.cemig.com.br/pt-br/A Cemig e o Futuro/inovacao/pesquisa e desenvolvimento/Paginas/PeD 327.aspx >. Acesso em: jan. 2014.

CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS - CGEE. Smart Grid no Brasil. s.d. Disponível em: < http://www.cgee.org.br/noticias/viewBoletim.php?in news=815&boletim >. Acesso em: Ago. 2014.

CHOI, T.-S. et al. **Analysis of energy savings using smart metering system and IHD (in-home display)**. Transmission & Distribution Conference & Exposition: Asia and Pacific**:** 1-4 p. 2009.

CRENSHAW, J. **Math Toolkit for Real-Time Development**. Lawrence, Kansas: CMP Books**:** 466 p. 2000.

DUDACEK, K.; VAVRICKA, V. **Experimental Evaluation of the MSP430 Microcontroller Power Requirements**. EUROCON, 2007. The International Conference on "Computer as a Tool"**:** 400-404 p. 2007.

ECHELON. **IEC Single Phase Smart Meters** 2014.

ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE - EPRI. **Paying Upfront: A Review of Salt River Project's M-Power Prepaid Program** 2010.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE. **Balanço Energético Nacional 2014** 2014.

ENERGY SAVING TRUST. Smart Meter. 2014. Disponível em: < http://www.energysavingtrust.org.uk/Electricity/Smart-meters >. Acesso em: 20 Jun.

ENERTECH, S. **Difference between a Solar Inverter and a Regular Inverter,** 2013.

FANG, X. et al. Smart Grid - The New and Improved Power Grid: A Survey. **Communications Surveys & Tutorials, IEEE,** v. 14, n. 4, p. 944-980, 2012. ISSN 1553-877X. Disponível em: < http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?reload=true&arnumber=6099519# >.

FERNANDES, F. et al. **Intelligent SCADA for Load control**. Systems Man and Cybernetics (SMC), 2010 IEEE International Conference on**:** 2987-2994 p. 2010.

GASPAR, P. D.; SANTO, A. E.; RIBEIRO, B. **MSP430 microcontrollers essentials - A new approach for the embedded systems courses: Part 1 - Overview and**

tools. Education and Research Conference (EDERC), 2010 4th European**:** 66-70 p. 2010.

GOMES, L. et al. **Dynamic Approach and Testbed for Small and Medium Players Simulation in Smart Grid Environments**. 19th World Congress of the International Federation of Automatic Control – IFAC 2014. Cape Town - Africa do Sul 2014.

HARRISON, S. Smart Metering Project Maps. 2007. Disponível em: < http://goo.gl/maps/fXq5 >.

HÖRMANN, L. B. et al. **A wireless sensor node for river monitoring using MSP430® and energy harvesting**. Education and Research Conference (EDERC), 2010 4th European**:** 140-144 p. 2010.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY - IEA. **RENEWABLE ENERGY - Market Analysis and Forecasts to 2020.** 2014.

JEJU. Smart Grid. 2014. Disponível em: < http://smartgrid.jeju.go.kr/ >.

JUNG, S.-M. et al. The prediction of network efficiency in the smart grid. **Electronic Commerce Research,** v. 13, n. 3, p. 347-356, 01 set 2013. ISSN 1389-5753. Disponível em: < http://link.springer.com/article/10.1007/s10660-013-9124-1 >.

LAMIN, H. **Medição Eletrônica em Baixa Tensão: Aspectos Regulatórios e Recomendações para Implantação**. 2009. 184 f.. (Mestrado). Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília - Faculdade de Tecnologia, Brasília/DF.

_____. **Análise de Impacto Regulatório da Implantação de Redes Inteligentes no Brasil**. 2013. 300 f.. (Doutorado). Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília - Faculdade de Tecnologia, Brasília/DF.

LANDIS+GYR. **Electricity Meters,** 2014.

LEITE, D. R. V. **Medidores Eletrônicos: Uma Análise da Viabilidade Econômica no Contexto das Redes Inteligentes**. 2013. 81 f.. (Mestrado). Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília - Faculdade de Tecnologia, Brasília/DF.

MICROCHIP. PIC18F87J72 Single Phase Energy Meter Reference Design. 2011. Disponível em: < http://www.microchip.com/Developmenttools/ProductDetails.aspx?PartNO=ARD00280 >.

OZOG, M. **The Effect of Prepayment on Energy Use**: DEFG 2013.

PORTAL DO ELETRICISTA. Medidor Elétrico Externo. 2014. Disponível em: < http://www.portaleletricista.com.br/medidor-eletrico-externo/ >.

PROCON. Procon esclarece duvidas sobre consumo de energia elétrica. 2014. Disponível em: < http://www.treslagoas.ms.gov.br/noticia/procon-esclarece-duvidas-sobre-consumo-de-energia-eletrica/8924/ >.

QUINTOARMÓNICOES. Diferencias entre Cosφ y Factor de Potencia. 2008. Disponível em: < http://quintoarmonico.es/2008/07/17/diferencias-entre-cos%CF%86-y-factor-de-potencia/ >.

RAMOS, C. C. O. et al. A New Approach for Nontechnical Losses Detection Based on Optimum-Path Forest. **Power Systems, IEEE Transactions on,** v. 26, n. 1, p. 181-189, 2011. ISSN 0885-8950.

SCIENCEALERT. Renewable energy now makes up 22% of the world's power. 2014. Disponível em: < http://sciencealert.com.au/news/20142908-26092.html >. Acesso em: 29 Ago.

SMITH, S. W. **The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing**. San Diego, California: California Technical Publishing 1999.

SUHETT, M. R. **ANÁLISE DE TÉCNICAS DE MEDIÇÃO DE POTÊNCIA REATIVA EM MEDIDORES ELETRÔNICOS**. 2008. 106 f.. (Mestrado). Eng. Eletrica, Universidade Federal do Rio de Janeiro

SUI, H.; SUN, Y.; LEE, W.-J. **A demand side management model based on advanced metering infrastructure**. Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT), 2011 4th International Conference on**:** 1586-1589 p. 2011.

SUNRISE. **ST12/13SF Single Phase ANSI Residential Electricity Meter,** 2014.

TEMNEANU, M.; ARDELEANU, A. S. **Hardware and software architecture of a smart meter based on electrical signature analysis**. Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE), 2013 8th International Symposium on**:** 1-6 p. 2013.

TEXAS INSTRUMENTS. **Current-Transformer Phase-Shift Compensation and Calibration**. Texas Instruments. Application Report - SLAA122. 2001

_____. **Using the Real-Time Clock Library**. Texas Instruments. Application Report - SLAA290A. 2011

_____. **Sub-metering made easy using Texas Instruments energy measurement ICs**. Texas Instruments. White Paper - SLAY020. 2012

_____. Class 0.2 Single-Phase E-meter. 2013a. Disponível em: < http://www.ti.com/tool/TIDM-SINGLEPHASEMETER >.

_____. **Implementation of a Single-Phase Electronic Watt-Hour Meter Using the MSP430AFE2xx**. Texas Instruments. Application Report - SLAA494A. 2013b

_____. **MSP430® IQmathLib Users Guide**. 2014

THOMSON REUTERS. Web Of Science. 2014. Disponível em: < www.webofknowledge.com >. Acesso em: 15 ago.

U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. **What the smart grid means to Americans**. United States of America: United States of America. 1**:** 23 p. 2010.

UK POWER. Prepayment Meters. 2014. Disponível em: < http://www.ukpower.co.uk/home_energy/prepayment-meters >.

USWITCH. Prepayment meters explained. 2014. Disponível em: < http://www.uswitch.com/gas-electricity/guides/prepayment-meters/ >.

WEISS, M. et al. **Leveraging smart meter data to recognize home appliances**. IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications. Lugano**:** 191-197 p. 2012.

WERANGA, K. S. K.; CHANDIMA, D. P.; KUMARAWADU, S. P. **Smart metering for next generation energy efficiency & conservation**. Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT Asia), 2012 IEEE**:** 1-8 p. 2012.

ZHOU, L.; XU, F.-Y.; MA, Y.-N. **Impact of smart metering on energy efficiency**. Machine Learning and Cybernetics (ICMLC), 2010 International Conference on. 6**:** 3213-3218 p. 2010.

APÊNDICE I – Teste algoritmos – Sinais gerados via software

A tabela a seguir apresenta o resultado dos testes envolvendo os algoritmos para cálculo de rms, THD, FD e FP. Sinais gerados dentro do algoritmo.

Tabela III – Teste dos algoritmos – Sinais gerados via software

Sinal ideal	rms	THD ideal	rms smart meter	THD smart meter	erro rms	erro THD
pura	0,4143267	0,00%	0,4140525	0,00%	-0,07%	0,00%
1ª + 3ª	0,4270783	25,00%	0,4267927	25,02%	-0,07%	0,08%
1ª+3ª+5ª	0,4302072	27,95%	0,4299187	27,97%	-0,07%	0,07%
1ª+3ª+5ª+7ª	0,4309882	28,64%	0,4306972	28,66%	-0,07%	0,07%
Sinal senoidal puro 60Hz						
cos φ	**FD ideal**	**FP ideal**	**FD algoritmo**	**FP algoritmo**	**erro FD**	**erro FP**
0	1,000000	1,000000	0,999992	0,999992	-0,0008%	-0,0008%
30	0,866025	0,866025	0,865982	0,865982	-0,0050%	-0,0050%
45	0,707106	0,707106	0,707054	0,707054	-0,0073%	-0,0073%
60	0,500000	0,500000	0,499901	0,499901	-0,0198%	-0,0198%
Sinal senoidal + 3ª harmônica (25% THD)						
cos φ	**FD ideal**	**FP ideal**	**FD algoritmo**	**FP algoritmo**	**erro FD**	**erro FP**
0	1,000000	0,970143	0,995079	0,965322	-0,4921%	-0,4969%
30	0,866025	0,840168	0,861771	0,836000	-0,4913%	-0,4960%
45	0,707106	0,685994	0,703613	0,682572	-0,4939%	-0,4987%
60	0,500000	0,485071	0,497490	0,482613	-0,5020%	-0,5068%
Sinal senoidal + 3ª harmônica + 5ª harmônica (27,95% THD)						
cos φ	**FD ideal**	**FP ideal**	**FD algoritmo**	**FP algoritmo**	**erro FD**	**erro FP**
0	1,000000	0,963089	0,994644	0,957876	-0,5356%	-0,5412%
30	0,866025	0,834059	0,861389	0,829547	-0,5353%	-0,5409%
45	0,707106	0,681006	0,703301	0,677303	-0,5382%	-0,5438%
60	0,500000	0,481544	0,497269	0,478887	-0,5463%	-0,5519%
Sinal senoidal + 3ª harmônica + 5ª harmônica + 7ª harmônica (28,64% THD)						
cos φ	**FD ideal**	**FP ideal**	**FD algoritmo**	**FP algoritmo**	**erro FD**	**erro FP**
0	1,000000	0,961350	0,994583	0,956087	-0,5417%	-0,5475%
30	0,866025	0,832553	0,861336	0,827997	-0,5415%	-0,5472%
45	0,707106	0,679776	0,703255	0,676034	-0,5447%	-0,5504%
60	0,500000	0,480675	0,497238	0,477992	-0,5524%	-0,5582%

APÊNDICE II – Teste algoritmos – Sinais gerados via interface

A tabela a seguir apresenta o resultado dos testes envolvendo os algoritmos para cálculo de rms, THD, FD e FP. Sinais gerados via gerador arbitrário.

Tabela IV – Teste dos algoritmos – Sinais gerados via gerador arbitrário

Sinal ideal	rms	THD ideal	rms smart meter	THD smart meter	erro rms	erro THD
pura	0,3533	0,00%	0,3545	0,00%	0,34%	0,00%
1ª + 3ª	0,3648	25,00%	0,3644	24,72%	-0,11%	-1,12%
1ª+3ª+5ª	0,3676	27,95%	0,3674	27,55%	-0,05%	-1,43%
1ª+3ª+5ª+7ª	0,3683	28,64%	0,3674	28,30%	-0,26%	-1,19%
Sinal senoidal puro 60Hz						
cos φ	**FD ideal**	**FP ideal**	**FD algoritmo**	**FP algoritmo**	**erro FD**	**erro FP**
0	1,000000	1,000000	0,999985	0,999985	-0,0015%	-0,0015%
30	0,866025	0,866025	0,866379	0,866379	0,0409%	0,0408%
45	0,707106	0,707106	0,706467	0,706467	-0,0904%	-0,0904%
60	0,500000	0,500000	0,501549	0,501549	0,3098%	0,3097%
Sinal senoidal + 3ª harmônica (25% THD)						
cos φ	**FD ideal**	**FP ideal**	**FD algoritmo**	**FP algoritmo**	**erro FD**	**erro FP**
0	1,000000	0,970143	0,995064	0,965586	-0,4936%	-0,4697%
30	0,866025	0,840168	0,861740	0,836229	-0,4948%	-0,4687%
45	0,707106	0,685994	0,701988	0,681309	-0,7238%	-0,6828%
60	0,500000	0,485071	0,496025	0,481513	-0,7950%	-0,7336%
Sinal senoidal + 3ª harmônica + 5ª harmônica (27,95% THD)						
cos φ	**FD ideal**	**FP ideal**	**FD algoritmo**	**FP algoritmo**	**erro FD**	**erro FP**
0	1,000000	0,963089	0,994606	0,958483	-0,5394%	-0,4783%
30	0,866025	0,834059	0,861694	0,830433	-0,5001%	-0,4348%
45	0,707106	0,681006	0,702896	0,677667	-0,5954%	-0,4903%
60	0,500000	0,481544	0,497849	0,479783	-0,4303%	-0,3658%
Sinal senoidal + 3ª harmônica + 5ª harmônica + 7ª harmônica (28,64% THD)						
cos φ	**FD ideal**	**FP ideal**	**FD algoritmo**	**FP algoritmo**	**erro FD**	**erro FP**
0	1,000000	0,961350	0,994400	0,956989	-0,5600%	-0,4536%
30	0,866025	0,832553	0,860115	0,827651	-0,6824%	-0,5888%
45	0,707106	0,679776	0,704468	0,677853	-0,3731%	-0,2829%
60	0,500000	0,480675	0,498421	0,479623	-0,3159%	-0,2189%

APÊNDICE III – Tabela de custos

A tabela a seguir apresenta o custo dos componentes utilizados para a confecção do protótipo desenvolvido.

Tabela V – Estimativa de custos para confecção do medidor – Ano 2014

Descrição do componente	Quantidade	Valor Unitário	Subtotal
Analog Board			
Resistores 1/8 W	19	$ 0,04	$ 0,71
Trimpot multivoltas	2	$ 0,25	$ 0,49
Capacitores cerâmicos	20	$ 0,04	$ 0,75
Capacitores Eletrolíticos	1	$ 0,25	$ 0,25
Diodos 1N4148	8	$ 0,04	$ 0,30
AmpOp MCP6004	2	$ 0,89	$ 1,78
Resistor Shunt 10 mΩ, 3W, 1%	5	$ 1,96	$ 9,81
Barra 40 pinos	1	$ 0,92	$ 0,92
PCB fibra de vidro dupla camada	1	$ 1,46	$ 1,46
Main Board			
Resistores 1/8 W	8	$ 0,02	$ 0,13
Capacitores cerâmicos	15	$ 0,04	$ 0,56
Capacitores Eletrolíticos	4	$ 0,25	$ 1,00
Diodo 1N4007	1	$ 0,03	$ 0,03
Push Button	2	$ 0,10	$ 0,21
Cristal 32.768 Hz	1	$ 0,21	$ 0,21
AmpOp KA358	1	$ 0,80	$ 0,80
Regulador 3.3V LM1117	1	$ 0,63	$ 0,63
*MSP430F2013**	1	$ 3,07	$ 3,07
*MSP430G2955**	1	$ 4,22	$ 4,22
Memória Flash SPI 4Mb – W25X40A	1	$ 3,37	$ 3,37
Barra 40 pinos	2	$ 0,92	$ 1,83
PCB fibra de vidro dupla camada	1	$ 1,46	$ 1,46
Outros			
Display LCD Colorido 320x240	1	$ 6,25	$ 6,25
		Total	$ 40,25

** componentes obtidos como amostras através da Texas Instruments*