



Universidade Federal de Pernambuco  
Centro de Informática

Graduação em Engenharia da Computação

# **Análise de Formas de Medição de Consumo de Energia Elétrica no Setor Residencial**

Josiane Bezerra Ferreira

Trabalho de Graduação

Recife - PE  
06 de Julho de 2012

Universidade Federal de Pernambuco  
Centro de Informática

Josiane Bezerra Ferreira

# **Análise de Formas de Medição de Consumo de Energia Elétrica no Setor Residencial**

*Trabalho apresentado ao Programa de Graduação em  
Engenharia da Computação do Centro de Informática da  
Universidade Federal de Pernambuco como requisito  
parcial para obtenção do grau de Engenheiro da  
Computação.*

Orientador: *Sergio Vanderlei Cavalcante*

Recife - PE  
06 de Julho de 2012

*Aos meus pais.*

## **Agradecimentos**

Deixo registrada aqui a minha gratidão ao meu professor e orientador Sérgio Cavalcante pela disponibilidade, apoio e paciência durante o desenvolvimento desse trabalho; e à professora Carolina Salgado pela disponibilidade em avaliá-lo.

Agradeço também aos demais professores e funcionários do Centro de Informática que contribuíram para a minha formação, em especial ao professor Cristiano que me acompanhou durante mais de dois anos em um projeto de Iniciação Científica.

Agradeço aos meus pais, que são a minha base e a razão da minha determinação; e a minha irmã e amigos pelo apoio em momentos de dúvida. Agradeço também a minha prima Ana Karlla e ao meu primo Flávio pelo apoio imensurável que me foi dado durante todos os anos de curso.

Por fim, agradeço ao meu namorado Paulo pelo apoio e ajuda, técnica e moral, em todos os momentos.

*“A indiferença com o meio ambiente é  
a convivência com nossa destruição.”*

- Hans Alois

## Resumo

A gestão de recursos energéticos é um dos principais problemas enfrentados pela sociedade moderna. A participação ativa dos consumidores na gestão dos seus consumos é de fundamental importância para a redução dos impactos ambientais provocados pela produção de energia elétrica. Para que isso seja possível, os consumidores precisam de informações detalhadas sobre o seu consumo de energia. As *Smart Grids*, juntamente com os medidores inteligentes, possibilitam um maior controle aos usuários domésticos sobre o uso da energia, constituindo um importante fator no processo de redução do consumo e das emissões de CO<sub>2</sub>. Esse documento traz uma visão geral sobre o mercado de *Smart Grids* no Brasil e no mundo e sobre as formas de medição e monitoramento de energia, além de descrever o projeto e implementação de um estudo de caso que consiste em um medidor de energia elétrica que processa informações em tempo real.

**Palavras-chave:** *Smart Grids*, *smart meters*, monitoramento de energia.

## Sumário

Agradecimentos .....	2
Resumo.....	4
Lista de Figuras.....	7
Lista de Tabelas.....	9
1. Introdução.....	10
2. Visão Geral .....	12
2.1. Background .....	12
2.1.1. O Setor Elétrico Brasileiro .....	13
2.1.2. Medição de energia .....	14
2.1.3. <i>Smart Grids</i> .....	17
2.2. Smart Meters .....	22
2.2.1. Benefícios .....	23
2.2.2. Desafios .....	24
2.2.3. Instalações no mundo .....	24
2.2.4. Instalações no Brasil e regulamentação brasileira.....	25
2.3. A importância do monitoramento do consumo de energia .....	28
3. Sistemas de Monitoramento de Energia Elétrica .....	30
3.2. <i>Home Energy Monitors</i> .....	31
3.3. Sistemas para Medição de Consumo de Eletrodomésticos .....	32
4. Modelo Proposto .....	44
4.1. Descrição do Sistema .....	45
4.2. Implementação do Sistema .....	53
4.2.1. Hardware.....	53
4.2.2. Firmware .....	58

4.2.3. Software.....	60
4.3. Resultados .....	60
4.3.1. Teste do Hardware.....	61
4.3.2. Teste do Software .....	63
5. Dificuldades Encontradas.....	66
6. Conclusões .....	68
7. Referências .....	69

## Lista de Figuras

Figura 1 - Processo de Geração e Distribuição de Energia .....	15
Figura 2 – Medidor Eletromecânico .....	16
Figura 3 - Custos de uma Infraestrutura de Medição.....	24
Figura 4 - Arquitetura de uma HAN.....	31
Figura 5 - Kill a Watt.....	33
Figura 6 - Kill a Watt Graphic Timer P4480.....	33
Figura 7 - Plogg.....	34
Figura 8 - Power-Mate.....	34
Figura 9 - Power Meter .....	35
Figura 10 – Watts Up?.....	36
Figura 11 - Arquitetura da Rede Formada pelo AlertMe.....	36
Figura 12 - Formas de Monitoramento Fornecidas pelo AlertMe .....	37
Figura 13 - SmartPlug.....	37
Figura 14 - Snapgrid.....	38
Figura 15 - Display do Snapgrid .....	38
Figura 16 - Gráfico Gerado pelo Snapgrid.....	39
Figura 17 - ElectriSense .....	39
Figura 18 - Interface do ElectriSense.....	40
Figura 19 - Dispositivo Desenvolvido por Lee et al .....	42
Figura 20 Mapeamento de Potência .....	45
Figura 22 - Arduino.....	48
Figura 23- Microprocessador mais Periféricos .....	48
Figura 24 - Microcontrolador .....	49
Figura 25 - Diagrama de Blocos do ATmega168.....	50

Figura 26 - <i>Pinout</i> do Arduino.....	51
Figura 27 - IDE Arduino.....	52
Figura 28 - Ciclo de Desenvolvimento de uma Aplicação .....	52
Figura 30 - Obtenção dos Sinais de Tensão e Corrente.....	54
Figura 31 - Transformador de Tensão Utilizado no Circuito.....	55
Figura 32 - Circuito para Condicionamento do Sinal de Tensão .....	56
Figura 33 - Filtro de Linha Adaptado para Sensoriamento de Corrente ...	57
Figura 34 - Circuito para Condicionamento do Sinal de Corrente .....	57
Figura 35 - Circuito Para Coleta de Amostras de Tensão e Corrente.....	58
Figura 36 - Etapas Executadas pelo <i>Firmware</i> .....	58
Figura 37 - Interface para Exibição dos Resultados .....	61
Figura 38 - Ondas de Tensão e Corrente de uma Carga Resistiva .....	62
Figura 39 - Ondas de Tensão e Corrente de uma Carga Reativa .....	62
Figura 40 - Ondas de Tensão e Corrente de uma Carga Não Linear .....	62
Figura 41 - Ondas de Tensão e Corrente do Primeiro Experimento .....	63
Figura 42 - Curvas de Tensão e Corrente do Segundo Experimento.....	64
Figura 43 - Interface sem Cargas Ligadas ao Sistema.....	64
Figura 44 - Interface com uma Carga Resistiva Ligada ao Sistema.....	65
Figura 45 - Transformador para Sensoriamento de Corrente .....	66

## Lista de Tabelas

Tabela 2.1 - Comparação entre funcionalidades das redes atuais e das <i>Smart Grids</i> .....	18
Tabela 2.2 - Contribuição das <i>Smart Grids</i> para a redução da emissão de poluentes .....	20
Tabela 3.1 - Comparação entre dispositivos para medição de consumo de eletrodomésticos.....	43
Tabela 4.1 - <i>Pinout</i> do Arduino .....	49

## 1. Introdução

A energia elétrica tornou-se um dos motores da sociedade moderna, o que faz com que o seu uso cresça significativamente com o passar dos anos. O aumento no consumo implica na necessidade de aumentar a produção, ampliando e construindo novas fontes, o que tem como consequência uma série de impactos ambientais.

Para amenizar esses impactos é necessário o uso eficiente da energia elétrica. O setor residencial é responsável por cerca de 30% do consumo total de energia elétrica no Brasil (ANEEL, 2002), e tem uma capacidade de redução de até 15% (ANEEL, 2002).

Porém, para que o usuário doméstico possa controlar de forma eficiente o seu consumo de energia é necessário o fácil acesso às informações detalhadas relativas ao seu consumo, fato que é diferente da realidade, como comprova um estudo realizado pela IBM (IBM Institute for Business Value, 2007).

As melhorias nas redes de energia, com os surgimento das *Smart Grids* e das técnicas de *smart metering*, pretendem mudar esse cenário.

As *Smart Grids*, como redes elétricas inteligentes, permitem uma maior interação do usuário com o sistema, uma vez que são capazes de integrar os comportamentos e ações de todos os usuários conectados, disponibilizam acesso a informações de consumo e permitem ao usuário participar, inclusive, na geração de energia. O principal objetivo dessas redes é criar um sistema com perdas reduzidas e maior qualidade e segurança no fornecimento.

Os elementos básicos necessários para o funcionamento das *Smart Grids* são os *smart meters*, medidores inteligentes que disponibilizam informações de consumo em tempo real e permitem comunicação de duas vias entre o consumidor e os centros de distribuição, o que permite às concessionárias a leitura remota do consumo, e ao usuário informar quedas de energia ou defeitos no medidor.

Além dos *smart meters* vários outros medidores, classificados como *home energy monitors*, tem sido usados para o monitoramento do consumo total de uma residência ou de eletrodomésticos individualmente, mas que não substituem o medidor convencional, são desenvolvidos exclusivamente para ajudar o consumidor a controlar e reduzir os seus consumos.

O objetivo desse trabalho é fornecer uma visão geral sobre as *Smart Grids* e as várias formas de monitoramento do consumo de energia elétrica no setor residencial, citar os principais métodos de identificação do consumo dos equipamentos ligados a rede elétrica, e desenvolver um protótipo capaz de fornecer informações relativas ao consumo de energia em tempo real.

O trabalho está dividido da seguinte forma: o segundo capítulo traz uma visão geral do problema de consumo de energia, descrevendo de forma geral o funcionamento do setor elétrico brasileiro, traz uma abordagem sobre o mercado de *Smart Grids* no Brasil e no mundo, sobre os desafios e benefícios trazidos pela instalação de *smart meters*, e por fim traz uma análise da importância do monitoramento de energia elétrica para a economia de energia.

O terceiro capítulo faz uma análise das formas existentes de monitoramento de consumo, trazendo os conceitos de *Home Area Network* e *Home Energy Monitors*.

No capítulo quatro são descritas as etapas de projeto, implementação e testes de um dispositivo para medição de energia em tempo real, capaz de fornecer diversos dados relativos ao consumo de energia. No capítulo cinco são descritas as principais dificuldades encontradas na elaboração desse trabalho, e por fim, no capítulo seis, são listadas as conclusões e os trabalhos futuros.

## 2. Visão Geral

A economia de energia elétrica tornou-se um problema bastante popular, principalmente devido à necessidade de preservação de recursos naturais.

No setor residencial, existem várias abordagens a esse problema, sendo uma delas focada na forma como as informações de consumo de energia chegam ao cliente.

### 2.1. Background

O consumo de energia elétrica no Brasil vem crescendo exponencialmente ao longo dos anos. No setor residencial esse crescimento é justificado por fatores como o aumento no número de domicílios, cuja previsão é de que passará de 58 milhões em 2009 para cerca de 75 milhões de unidades em 2020, e a posse de equipamentos que também cresce de forma perceptível (Ministério de Minas e Energia, 2001).

Dados esses fatores, a previsão é que o consumo de energia chegue a 730 TWh (Terawatts-hora) em 2020, enquanto a capacidade de geração total de energia instalada, somando o Sistema Interligado Nacional e os Sistemas Isolados, é de 106 TWh (Ministério de Minas e Energia, 2001), apenas 15% do total necessário.

A solução proposta é a expansão e construção de novas fontes. Planeja-se até 2020 a construção de mais de 80 usinas, entre termelétricas e hidrelétricas, e uma usina nuclear (Ministério de Minas e Energia, 2001).

A consequência disso é uma série de impactos ambientais e financeiros. Visando minimizar esses efeitos, muito tem sido feito com foco no uso eficiente da energia produzida.

Uma vez que o consumo residencial corresponde a cerca de 30% do consumo total de energia elétrica (ANEEL, 2002), e que boa parte desse consumo corresponde a desperdício de energia – o setor possui um potencial de redução de cerca de 15% (Kellerman, 2008) – o consumidor residencial tem sido foco de várias iniciativas relacionadas à economia de energia.

A falta de informação é um dos principais fatores que impedem o consumidor de alcançar um uso eficiente de energia elétrica (IBM Institute for Business Value, 2007). Um estudo recente da IBM, que entrevistou 10.000 pessoas em 15 diferentes países, revelou que muitos consumidores não entendem dados e informações básicas relativos ao seu próprio consumo de energia elétrica (IBM Institute for Business Value, 2007).

Essa falta de informações dificulta a tarefa de economizar energia, o que cria a necessidade de educar os consumidores com termos que eles entendam. Estudos mostram que é possível alcançar uma economia de 5-10% quando as pessoas obtêm informações de consumo de forma direta (Darby, 2006).

Uma forma de tornar claro o consumo para o usuário é fazê-lo saber quanto dinheiro foi gasto durante a utilização de determinado eletrodoméstico e quais eletrodomésticos estão sendo usados.

#### **2.1.1. O Setor Elétrico Brasileiro**

O Brasil possui um dos maiores potenciais energéticos do mundo – dados o seu potencial hídrico, de irradiação solar, biomassa e força dos ventos – sendo cerca de 90% da energia elétrica gerada proveniente de usinas hidrelétricas, em virtude de características como a disponibilidade dos recursos, a facilidade de aproveitamento e, principalmente, o seu caráter renovável (ANEEL, 2002).

A energia hidráulica é obtida através da energia potencial de uma massa de água, que pode ser aproveitada através de uma queda d'água e ser convertida em energia mecânica através de turbinas hidráulicas (Wikipedia, 2012). As turbinas são usadas para acionar um gerador elétrico (Wikipedia, 2012) que, finalmente, produz energia elétrica para uma rede de energia.

Diferente das demais fontes renováveis, a energia hidráulica já representa uma parcela significativa da matriz energética mundial, com tecnologias devidamente consolidadas. Consiste na principal fonte geradora de energia para mais de 30 países e representa cerca de 20% de toda a eletricidade gerada no mundo (ANEEL, 2002).

Nesse contexto, o sistema hidrelétrico brasileiro conta com um sistema central e vários sistemas isolados, cada um deles composto por usinas, linhas de transmissão e ativos de distribuição. O sistema central, chamado Sistema Interligado Nacional (SIN), abrange a maior parte do território brasileiro; já os sistemas de menor porte, chamados Sistemas Isolados, se estendem principalmente na região Amazônica, devido às características geográficas da região, que dificultam a construção de linhas de transmissão de grande extensão que possam ser conectadas ao SIN.

Os principais agentes do setor elétrico brasileiro são as geradoras, transmissoras, distribuidoras e comercializadoras.

A energia elétrica é gerada nas usinas hidrelétricas através da conversão da energia mecânica, como descrito acima. A partir da usina a energia é transformada – nas subestações elétricas – a níveis de tensão elevados e transportada em corrente alternada através das linhas de transmissão, até as subestações rebaixadoras.

Na fase de distribuição a energia, que já foi tratada nas subestações e teve seu nível de tensão rebaixado e qualidade controlada, é então transmitida através de redes elétricas aéreas ou subterrâneas. Essas redes são constituídas por postes, torres, dutos subterrâneos, cabos elétricos e transformadores para novos rebaixamentos. Por meio dessa transmissão a energia é entregue aos clientes industriais, comerciais, de serviço e residenciais.

A Figura 1 ilustra todas as fases do processo, partindo da usina geradora até chegar aos clientes finais (ANEEL, 2002).

Como se pode perceber, a geração de energia é completamente centralizada, e a comunicação é feita de forma unidirecional, da fonte de energia até o cliente final.

### **2.1.2. Medição de energia**

Durante a evolução dos sistemas elétricos, foi constante a preocupação com a medida das grandezas envolvidas. Os primeiros dispositivos concebidos

para medir o consumo de energia baseava sua medição no tempo que uma lâmpada permanecia acesa (Dahle, 2010).

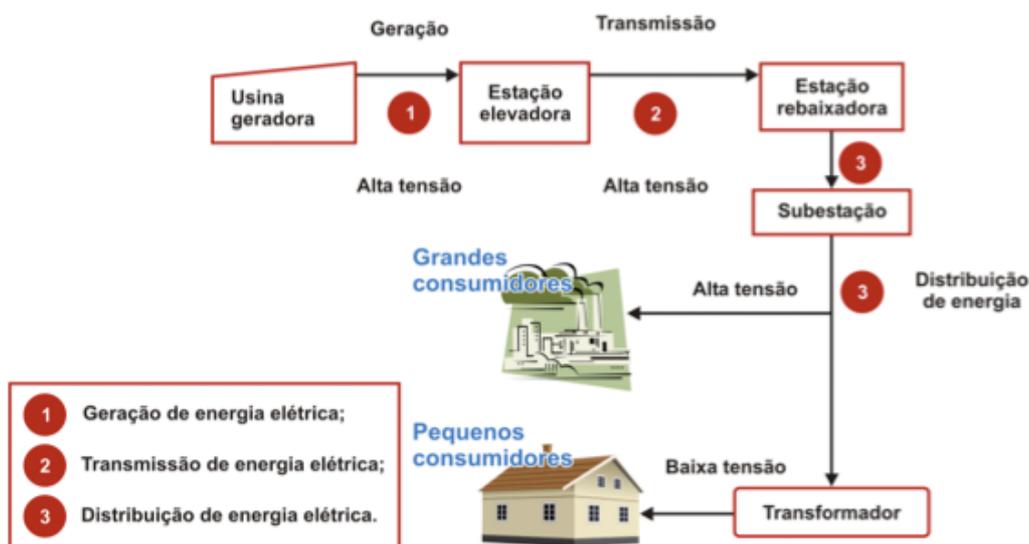


Figura 1 - Processo de Geração e Distribuição de Energia

Atualmente, 92% dos medidores de energia utilizados são eletromecânicos, que possuem baixo custo e alta disponibilidade. Esse medidor é constituído pelos seguintes elementos principais:

- Um elemento motor, que consiste em dois circuitos magnéticos, cada um com uma bobina – uma de potencial e outra de corrente – cujos campos magnéticos resultantes são proporcionais à tensão e a corrente do circuito medido;
- Um leve disco de alumínio suspenso na região do campo magnético criado pela bobina de corrente, onde são induzidas correntes parasitas, de modo a fazer com que o disco gire no seu próprio eixo. O número de rotações do disco é proporcional à energia consumida pela carga em certo intervalo de tempo, fornecendo a medida do consumo de energia em quilowatt-hora (KWh).

Esses medidores possuem erro máximo de  $\pm 2\%$  do valor indicado para a sua faixa nominal de operação, dentro do tempo de vida previsto para o seu

funcionamento. Trata-se de um valor relativamente alto, considerando as perdas que podem onerar tanto o fornecedor quanto o consumidor de energia elétrica.

Além disso, devido as suas características de construção, tais como o uso de equipamentos indutivos, os medidores eletromecânicos possuem algumas limitações e restrições para que o seu funcionamento seja confiável, como: interferência na operação na presença de corrente contínua (uma vez que a presença desse tipo de corrente pode causar deformações nos fluxos magnéticos produzidos); diminuição da precisão para valores muito baixos de potência (uma vez que o atrito do conjunto mecânico é alto em relação ao torque eletromagnético produzido pelo disco); e por último, os mecanismos destes instrumentos são sensíveis a vibrações e choques produzidos por elementos externos, dificultando sua aplicação em ambientes mecanicamente instáveis ou em aplicações embarcadas.

Para leitura da medição, é necessário ir até o local onde o medidor está instalado e ver o valor nele registrado, ilustrado na Figura 2.



Figura 2 - Medidor Eletromecânico

Existe uma forte tendência à substituição dos medidores eletromecânicos por medidores digitais visando, além de uma maior precisão na medição, a possibilidade de leitura remota do consumo de energia ou de aplicação de uma tarifação diferenciada controlada pela faixa de horário ou pela central de distribuição.

Os *smart meters*, ou medidores inteligentes, são medidores eletrônicos com capacidade de processamento, armazenamento e comunicação, que vão muito além da mensuração de consumo. Eles permitem a troca de informação em tempo real e de forma bidirecional entre a empresa de eletricidade e o usuário final, e ainda o monitoramento da qualidade da energia.

Tecnicamente, esses equipamentos possuem precisão de 1%, possibilitada principalmente pelo fato de não existirem limitações mecânicas nos elementos envolvidos no processo de medição e registro, e pela possibilidade de empregar sensores de alta precisão.

Por possuírem circuitos e dispositivos baseados em semicondutores, podem ser sensíveis a surtos de tensão eventualmente presentes no sistema de distribuição. Portanto, o projeto desse tipo de dispositivo envolve necessariamente cuidados para que estes tipos de eventos não comprometam o funcionamento dos componentes sensíveis, preservando a confiabilidade e precisão.

Com esses dispositivos, o consumidor tem acesso a diversas informações, tais como o preço da energia fornecida e o quanto de energia já foi consumida até então ou está sendo consumida naquele momento, em KW ou em termos financeiros.

### **2.1.3. *Smart Grids***

No modelo atual de redes de energia o consumidor não possui informações sobre o sistema e não tem nenhuma participação na geração. Além disso, essas redes possuem mecanismos muito limitados para a coordenação da operação, confiabilidade e qualidade do sistema.

As *Smart Grids*, ou redes elétricas inteligentes, entram em cena para mudar esse quadro. Capazes de integrar o comportamento e as ações de todos os usuários conectados, essas redes têm por objetivo principal criar, de forma eficiente e econômica, um sistema de energia sustentável com baixas perdas e elevados níveis de qualidade e segurança de fornecimento, onde os consumidores possam ter um perfil dinâmico, que permita exercer controle

sobre a energia que usam, tendo acesso a várias informações e participando, inclusive, da geração de energia (Paula, 2011).

De acordo com a *International Energy Agency* (IEA), uma *Smart Grid* é uma rede de eletricidade que utiliza tecnologia digital para monitorar e gerenciar o transporte de eletricidade a partir de todas as fontes de geração. Essas redes estarão aptas a coordenar as necessidades e capacidades de todos os geradores, operadores, usuários finais e *stakeholders* do mercado de eletricidade, de forma a aperfeiçoar a utilização e operação dos ativos no processo, minimizando os custos e impactos ambientais enquanto mantém a confiabilidade, resiliência e estabilidade do sistema (Bradley, 2010).

A medição inteligente (*smart metering*) é considerada como sendo a primeira etapa da implantação de uma *Smart Grid*. Consiste em um sistema composto por *smart meters*, infraestrutura para a comunicação de via dupla – isto é, canais de dados bidirecionais entre medidores e o Centro de Controle de Medição (CCM) – e softwares que permitem aquisição automática de dados do medidor em intervalos de tempo programáveis, envio de dados ao medidor de forma remota e gerenciamento do sistema (Vieira, 2011).

Em relação à operação do sistema, confiabilidade e qualidade as *Smart Grids* são proativas e não reativas como as redes atuais. A coordenação desses aspectos é feita em tempo real, com mecanismos avançados para restaurar qualquer dano que haja na rede, tentando minimizar ao máximo as perdas dos consumidores (Ferreira, 2010). Estima-se que melhorias da *Smart Grid* devem aliviar o congestionamento e aumentar a utilização da capacidade total, aumentando de 50% a 300% a distribuição de energia elétrica através da rede já existente (DOE: Departamento of Energy).

As novas funcionalidades introduzidas pelas *Smart Grids* são resumidas na Tabela 2.1 a seguir.

Tabela 2.1 - Comparação entre funcionalidades das redes atuais e das *Smart Grids*

Estágio Atual	Estágio pós-implantação
Medidores analógicos/eletromecânicos	Medidores digitais/microprocessadores
Geração Centralizada	Geração descentralizada

Estágio Atual	Estágio pós-implantação
Reativo (propensão a falhas e backups)	Proativo
Restauração manual	Restauração automática ou semiautomática
Um único preço	Precificação em tempo real
Limitação das escolhas do consumidor	Múltiplos produtos para o consumidor
Comunicação unilateral	Comunicação bilateral
Poucos sensores	Muitos monitores e sensores
Transparência limitada para consumidores e reguladores	Ampla transparência para consumidores e reguladores
Controle limitado sobre fluxos de energia	Controle total dos sistemas
Confiança estimada	Confiança preditiva

### *Implementação das Smart Grids*

As *Smart Grids* prometem ser o novo paradigma para a indústria elétrica, e prometem mudar o modelo de negócios da indústria inteira e sua relação com todos os *stakeholders*, incluindo serviços públicos, órgãos reguladores, prestadores de serviços de energia, fornecedores de tecnologia e automação, e todos os consumidores de energia elétrica (Ferreira, 2010), inclusive os residenciais, que terão novos hábitos incorporados ao seu cotidiano.

Nesse contexto haverá um espaço cada vez maior para a geração distribuída em pequena escala, voltada ao consumo local e ao fornecimento do excedente à rede de distribuição. Esses novos consumidores, que também produzem energia, são chamados “*prosumers*”.

Ao mesmo tempo, a automação dos sistemas elétricos dos usuários possibilitará o gerenciamento do consumo, evitando desperdícios e otimizando o sistema de suprimento (Bocuzzi, et al.).

No que diz respeito à implantação das *Smart Grids*, grande parte das barreiras tecnológicas que poderiam impedi-la já foram derrubadas, porém a sua viabilização exigirá um esforço de todos os agentes envolvidos, incluindo consumidores, empresas de eletricidade, e órgãos do governo. Os principais desafios a serem superados para a implantação dessas redes serão:

- A instalação dos medidores inteligentes;
- A comunicação bidirecional, que possibilitará o conhecimento em tempo real das condições de fios, cabos, transformadores e até o

consumo de dispositivos específicos instalados em qualquer ambiente, permitindo seu controle (ligar ou desligar);

- A implantação de uma interface com o consumidor, com aplicativos operacionais e de serviços por meio dos quais os clientes possam interagir;
- A implantação de programas de gerenciamento de demanda;
- A habilitação da *Home Area Network*, rede interna que permitirá aos consumidores acessar dados de consumo de energia elétrica de sua residência;
- A automatização e controle das redes de distribuição;
- O gerenciamento das medições em tempo real.

### **Smart Grids e o Meio Ambiente**

Embora a maior parte da geração de energia elétrica no Brasil seja proveniente de centrais hidrelétricas que usam fonte de energia renovável, os 20% restante, com exceção da energia eólica, podem gerar emissões de poluentes, contribuindo para as mudanças climáticas globais.

Os mecanismos propostos pelas *Smart Grids* serão de grande relevância para que as metas de redução de emissão desses poluentes sejam alcançadas, como é mostrado na tabela 2.2 (Bradley, 2010).

Tabela 2.2 - Contribuição das *Smart Grids* para a redução da emissão de poluentes

<b>Redução de emissão de gases</b>	<b>Mecanismos</b>
Melhoria na eficiência do usuário final	Economia de energia como consequência das informações e feedbacks disponibilizados ao consumidor
Melhoramento na eficiência de instalações	Melhora nos sistema de aquecimento, ventilação e de ar condicionado das construções, do sistema de iluminação...
Melhora na utilização das plantas de geração	Resposta à demanda com base em precificação dinâmica e redução da carga
Transporte mais limpo	Facilitação do desenvolvimento de carros elétricos e híbridos
Aumento da eficiência da rede	Através do avanço no controle da voltagem e na otimização da rede
Integração na distribuição de energias renováveis	Facilitando os fluxos bidirecionais e controle das redes de média e baixa tensão

Redução de emissão de gases	Mecanismos
Integração em larga escala de energias renováveis	Acomodando a variabilidade da produção renovável através do armazenamento e resposta à demanda

### *Smart Grids e os Horários de Pico*

O armazenamento de energia elétrica é muito custoso e inviável em larga escala, de forma que a energia deve ser consumida no momento em que é gerada. Por esse motivo, a infraestrutura da rede elétrica deve ser projetada de forma a suportar as maiores demandas, ficando subutilizada na maior parte do tempo, quando a demanda é inferior.

A capacidade de resposta em tempo real da *Smart Grid* torna possível reduzir o custo elevado de suprir a demanda nos horários de pico. Ela dá aos operadores da rede uma visibilidade muito maior do sistema com uma “granularidade” fina, o que lhes permite controlar as cargas de um modo que minimize a capacidade necessária para suportar os picos de demanda (U.S. Department of Energy).

Uma vez implementado, a *Smart Grid* deve reduzir em 5% o consumo residencial no horário de pico, entre 18h e 21h, como previu André Pepitone, diretor da Aneel. A economia equivale ao consumo de uma cidade com 10 milhões de habitantes ou de metade da geração prevista para a usina de Santo Antônio (U.S. Department of Energy).

### *Resumo das Características das Smart Grids*

A *Smart Grid* transforma a rede atual em uma rede que funcione de forma mais cooperativa, responsável e menos prejudicial ao meio ambiente.

Em uma visão global, suas principais características são, de acordo com o departamento de energia dos EUA (U.S. Department of Energy):

- *“Inteligente - capaz de sentir sobrecargas do sistema e reencaminhar a energia para evitar ou minimizar a queda do sistema; de trabalhar de forma autônoma quando as condições requerem resolução mais rápida do que os seres humanos podem responder; e cooperativa ao*

*alinhar os objetivos das concessionárias, consumidores e reguladores.*

- *Eficiente – capaz de suprir o aumento da demanda sem a necessidade de adicionar infraestrutura.*
- *Flexível – capaz de aceitar energia de praticamente qualquer fonte, incluindo solar e eólica, de forma tão fácil e transparente quanto aquela gerada por fontes como carvão de gás natural; capaz de integrar todas e quaisquer melhores ideias e tecnologias (tecnologias de armazenamento de energia, por exemplo) conforme estejam comprovadas no mercado e prontas para entrar em linha.*
- *Interativa – permite a comunicação em tempo real entre os consumidores e as concessionárias, de forma que os consumidores possam personalizar seu consumo de acordo com suas preferências individuais, como preço e/ou preocupações ambientais.*
- *Dúctil – cria novas oportunidades e mercados por meio de sua capacidade de capitalizar na inovação plug-and-play, onde e quando for apropriado.*
- *De qualidade - capaz de proporcionar a qualidade de energia necessária - sem quedas, picos, interferências e interrupções.*
- *Maleável - resistente a ataques e desastres naturais por ser descentralizada e reforçada com protocolos de segurança.*
- *“Verde” - retardando o avanço das variações climáticas globais e oferecendo um caminho dentro da realidade para a melhoria significativa do meio ambiente.” (tradução própria)*

## **2.2. Smart Meters**

A troca de medidores eletromecânicos por medidores eletrônicos tem sido implementada em diversos países desde a década de 80. Os *smart meters* são medidores eletrônicos capazes de armazenar os dados de consumo de energia em intervalos de uma hora ou menos, e enviar essa informação à concessionária no mínimo diariamente para fins de monitoramento e cobrança.

Esses medidores permitem uma comunicação de duas vias entre o consumidor e a central de distribuição, a coleta remota de dados, o monitoramento da qualidade da energia, e a notificação de quedas de energia. Além disso, por permitirem saber em que momento a energia foi consumida em cada local medido, possibilitam ainda que as agências atribuam preços diferentes com base no horário de consumo.

### **2.2.1. Benefícios**

Do ponto de vista do consumidor, os medidores inteligentes oferecem uma série de benefícios a toda família, dentre as quais se destacam:

- A possibilidade de prever o valor da conta de energia;
- A detecção imediata de falhas nos medidores, o que permite maior agilidade no reparo e maior confiança do consumidor com o acesso a informações detalhadas;
- O fato de ter uma ferramenta que pode ajudar a gerir melhor o seu consumo de energia, o que desperta a consciência do uso racional de energia. Acredita-se que, podendo a cobrança ser feita com base na hora do dia, os consumidores tendem a ajustar seus hábitos de consumo de forma a consumir menos nos horários de pico, quando a energia é mais cara (Federal Energy Regulatory Commission, 2008).

Do lado da concessionária, a medição inteligente pode revolucionar processos como gestão de ativos, detecção de fraudes e gerenciamento de falhas e quedas de energia, promovendo melhor qualidade e confiabilidade dos serviços. Permitirá também a redução de custos operacionais relacionados ao processo de precificação, uma vez que diminui o número de etapas entre o medidor e a distribuição da conta (Vieira, 2011).

A implantação da medição inteligente deverá, ainda, trazer aumento de receita para as concessionárias, pela rapidez com que falhas podem ser detectadas e corrigidas, pelo fato de não ser necessário ir até onde o medidor está instalado para fazer a leitura do consumo, e pela possibilidade de

desconexão remota, que possibilita a redução da evasão de receitas por contas não pagas ou atrasos nos cortes de clientes inadimplentes (Vieira, 2011).

### 2.2.2. Desafios

A Figura 3 mostra os custos relativos da implantação de uma infraestrutura de medição avançada (AMI - *Advanced Metering Infrastructure*).

Percebe-se que, dos custos envolvidos em um sistema AMI, o medidor (*endpoint hardware*) representa a maior parcela do investimento, sendo esse um dos principais desafios para a implementação desses sistemas. Além disso, pode-se destacar a necessidade do projeto de um sistema de comunicação que permita robustez, expansão e segurança, e a falta de consenso na padronização de interfaces e protocolos (Vieira, 2011).

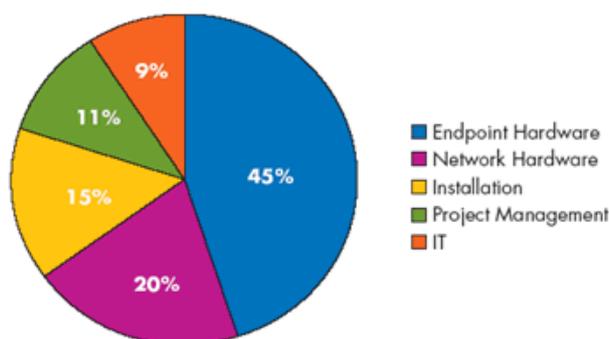


Figura 3 - Custos de uma Infraestrutura de Medição

### 2.2.3. Instalações no mundo

A maior implantação de medidores inteligentes no mundo foi feita pela concessionária italiana ENEL, a partir dos anos 2000, que completou a primeira instalação de *smart meters* com cerca de 30 milhões de dispositivos. O orçamento foi da ordem de dois bilhões de euros e a especificação do projeto está sendo publicada (Vieira, 2011). Entre 2000 e 2005, a ENEL implantou medidores inteligentes para toda a sua base de clientes (Wikipedia, 2012).

Esses medidores são totalmente eletrônicos e inteligentes, com comunicação bidirecional, medição de potência e capacidades avançadas de gestão, um sistema integrado, desconexão controlável por software, e um design

totalmente sólido. Eles se comunicam através de linhas de baixa tensão usando tecnologias baseadas em padrões da *Echelon Corporation*<sup>1</sup>.

O sistema fornece uma ampla gama de funções avançadas, incluindo a capacidade de ligar ou desligar remotamente a energia de um cliente, ler as informações de um medidor, detectar uma interrupção do serviço, alterar a quantidade máxima de eletricidade que um cliente pode exigir a qualquer momento, detectar o uso "não autorizado" de energia elétrica e remotamente desligá-lo, e alterar remotamente o plano de cobrança do medidor. Países Nórdicos, Espanha, França e Reino Unido também têm se comportado como mercados ativos neste contexto.

A América do Norte e países da Ásia-Pacífico (notadamente Japão, Coréia e China) são os dois mercados mais dinâmicos, com previsão de investimentos massivos em medição inteligente nos próximos 5 a 10 anos (Vieira, 2011). Na América do Norte é projetada uma base instalada de 78 milhões de medidores em 2015 (140 milhões em 2019), enquanto na Ásia-Pacífico projeta-se 116 milhões para 2015. Nos EUA, destaca-se a cidade de Houston (Texas), onde a concessionária *Centerpoint Energy* está implantando um total de dois milhões de medidores num programa que deverá ser concluído ainda em 2012.

Já os países da Ásia-Pacífico estão em estágio inicial de adoção da medição inteligente. Investimentos em larga escala iniciaram-se recentemente no Japão e na Coréia, enquanto a China permanece em projetos piloto. No entanto, reportagens têm sugerido que a base instalada de medidores inteligentes na China pode chegar a 250 milhões em 2020. Austrália e Nova Zelândia iniciaram instalações massivas de *smart meters* ao final da década passada.

#### **2.2.4. Instalações no Brasil e regulamentação brasileira**

No Brasil, a medição eletrônica é utilizada principalmente em unidades consumidoras do grupo de alta tensão, subestações e pontos de intercâmbio de

---

<sup>1</sup> Empresa americana que projeta redes de controle para conectar

energia. Para os consumidores residenciais e todos os outros do grupo de baixa tensão, a implementação desses medidores encontra-se ainda em fase embrionária. Faz-se necessário o estabelecimento de políticas públicas que definam diretrizes, metas e, principalmente, subsídios para os investimentos, de tal forma a não onerar o consumidor de energia elétrica.

Empresas como a Itron<sup>2</sup>, Landis+Gyr<sup>3</sup> e Elster<sup>4</sup> já fabricam medidores certificados pelo Inmetro. Destaca-se que modelos básicos desses medidores já se apresentam com preços inferiores aos dos medidores analógicos (Vieira, 2011).

Desde 2009 as concessionárias Light e Ampla do Rio de Janeiro vêm instalando medidores inteligentes com protocolos proprietários para consumidores em baixa tensão, que contribuíram em muito para a redução de fraudes no consumo de energia elétrica no Estado. No entanto, a ausência de um padrão nacional de comunicação para a medição eletrônica é certamente o maior limitante de uma maior penetração desta tecnologia no país, pois, sem este padrão, não se pode pensar na implementação de uma *Smart Grid* em nível nacional.

Atualmente, a Aneel está focada em definir o modelo de medidor eletrônico a ser instalado nas residências e em estabelecimentos comerciais e industriais atendidas em baixa tensão. Com este propósito, a agência instaurou em 2009 a Consulta Pública CP 015/2009, “Coleta de Subsídios para Formulação de Regulamento acerca de Implantação de Medidores Eletrônicos em Unidades Consumidoras de Baixa Tensão”.

A CP representa um importante passo para o entendimento de conceitos e aplicações de medição eletrônica e sua evolução no contexto da *Smart Grid*,

---

<sup>2</sup> <http://www.itron.com/>

<sup>3</sup> <http://www.landisgyr.com/bl/pt/pub/home.cfm>

<sup>4</sup> <http://energia.elster.com.br/>

porém não aborda questões relacionadas à infraestrutura de tecnologia e comunicação necessárias para a interação remota com medidores. O texto final da Resolução deve definir apenas questões básicas, como por exemplo, necessidade de comunicação bidirecional.

A Aneel propôs, através da Nota Técnica 0044/2010, que o Plano de Substituição de Medidores (PSM) eletromecânicos por eletrônicos seja regulamentado em duas etapas (Vieira, 2011):

- Na primeira, serão estabelecidos requisitos mínimos para medidores eletrônicos instalados no Brasil em Resolução Normativa (definição do padrão do medidor), a ser aplicada a unidades de consumo residenciais não enquadrados como baixa renda;
- Em seguida, será definida a forma de substituição do parque de medição nacional, estabelecendo-se os prazos, também através Resolução Normativa específica.

Esse processo em duas etapas foi ratificado em 26 de Janeiro de 2011 na sessão presidencial da Audiência Pública 043/2010, relativa à CP 015/2009, estabelecendo um prazo de 18 meses, a partir da publicação da Resolução Normativa, para que as distribuidoras passem a utilizar o novo sistema de medição.

A proposta de regulamentação do padrão do medidor eletrônico estabelece como grandezas a serem medidas a tensão, a energia elétrica ativa consumida e a energia elétrica reativa requerida; e como funcionalidades complementares o registro de frequências de interrupções, o registro de duração de interrupções, o registro de duração de transgressão de tensão, a capacidade de aplicação de quatro postos tarifários e a capacidade de atuação, parametrização e leitura remota. Deverá haver no mínimo um meio de comunicação entre o sistema central e o medidor provendo comunicação bidirecional via protocolo de comunicação público. O consumidor deverá acessar as informações de consumo de energia elétrica ativa e reativa através do

mostrador do medidor, que deverá mostrar também o posto tarifário e dados sobre a qualidade de energia (Vieira, 2011).

Superados esses desafios de regulamentação, a implantação da medição inteligente no Brasil será de grande vantagem, uma vez que o possui um grande potencial de economia. Além disso, os melhoramentos no serviço de energia elétrica trazem outros benefícios de grande valia, como menos interrupções, redução de “perdas não técnicas” (roubo de energia) e reforço na eficiência do sistema.

Clientes brasileiros sofrem de uma média de 16 horas de interrupções por ano. Em contraste, os clientes nos países da OECD<sup>5</sup> têm apenas cerca de uma hora no total de interrupções por ano. Quanto ao roubo de energia, no Norte do Brasil, esse pode chegar a até 40% da produção; já na região Sudeste, o roubo compreende apenas 1-2% da produção (King, 2011).

A eficiência dos medidores inteligentes em solucionar esses problemas pode ser comprovada observando resultados da sua implementação em outros países: na Jamaica a implantação de sistemas de medição inteligente levou a uma redução de 90% do roubo de energia; além disso, destaca-se que em países desenvolvidos, como os EUA, a rapidez na resposta à demanda e a possibilidade de gerar tarifas promocionais em determinados horários do dia, reduziu a demanda de pico e permitiu uma redução de 3% do consumo nesses horários (King, 2011).

### **2.3. A importância do monitoramento do consumo de energia**

Conhecida a capacidade das *Smart Grids* e dos medidores inteligentes de manterem os usuários informados sobre o seu consumo de energia, pode-se analisar quais benefícios esse tipo de informação traz ao consumidor.

---

<sup>5</sup> *Organization for Economic Co-operation and Development* - <http://www.oecd.org/>

Um estudo realizado pela IBM intitulado “2011 IBM Global Utility Consumer Survey” revelou dados preocupantes: muitos dos consumidores em todo o mundo desconhecem o custo da energia eléctrica assim como outros conceitos básicos relativos ao seu consumo. Os resultados expõem uma grande lacuna entre o que os consumidores atualmente sabem e o que eles deviam saber para reduzir o consumo e tirar partido dos benefícios da gestão inteligente de energia.

Estudos comprovam que o acompanhamento dos gastos com eficiência e dinamicidade propicia a prática do uso racional da energia eléctrica. Os primeiros estudos referentes ao monitoramento de energia e seus impactos no consumo energético datam da década de 70, esses estabeleceram que os sistemas de monitoramento que disponibilizavam informações sobre o consumo de energia de uma residência, através de mostradores, causavam impactos na forma como os consumidores usavam a energia (Darby, 2006).

Uma explicação para isso é que o uso da energia no meio doméstico é invisível ao usuário, ou seja, a maioria das pessoas não possui plena consciência sobre o montante de energia que está sendo utilizado. Desta forma, torna-se mais difícil saber que mudança de atitude no dia-a-dia poderia resultar em práticas mais eficientes, a fim de diminuir o consumo energético.

Assim, sistemas de monitoramento em que é possível acompanhar a evolução do consumo se tornam uma ferramenta de aprendizado, permitindo aos usuários aprenderem a controlar seu consumo de forma mais eficiente por meio da experimentação. Constatou-se que medidores que conseguem dar um *feedback* imediato e de fácil acesso permitem uma economia de energia na faixa de 5-15% (Darby, 2006). Portanto, conclui-se que a medição inteligente é uma forma promissora de fornecer informações, as quais permitem aos consumidores observar como as mudanças de hábitos alteram os gastos com energia eléctrica de forma mais rápida, se comparado ao controle feito através das faturas de energia recebidas a cada mês (Roth, et al., 2008).

### 3. Sistemas de Monitoramento de Energia Elétrica

Até aqui foi mostrada a importância da obtenção de informações detalhadas sobre o consumo para ajudar no uso eficiente de energia elétrica. Os medidores inteligentes são capazes de oferecer informações de consumo como tensão, corrente, potência, impedância, fator de potência, potência aparente, etc. No entanto, esse tipo de dado não faz com que os usuários entendam o seu uso de energia e, portanto, não podem ajudá-los a melhorar o seu conhecimento sobre eficiência energética. Informações detalhadas para os usuários devem ser quanto em dinheiro está sendo gasto por determinado eletrodoméstico, quais eletrodomésticos estão sendo usados no momento, e assim por diante. Dessa forma, os usuários podem ter uma visão clara de todos os aparelhos e facilmente entender a situação do consumo de energia (Lee, et al., 2010).

#### 3.1. O Conceito de *Home Area Network*

*Home Area Network* (HAN) é uma rede residencial para comunicação entre dispositivos digitais. Nos seus primórdios, no final dos anos 90 e início dos anos 2000, tinham como principal objetivo a comunicação entre computadores pessoais, impressoras e o compartilhamento de uma conexão com a Internet.

Atualmente as HANs tem um novo objetivo, o qual consiste em proporcionar uma visão de *Smart Grid* no nível residencial de forma a permitir que os consumidores entendam e gerenciem melhor o seu consumo de energia.

Grande parte do consumo de alto custo vem equipamentos de aquecimento/resfriamento, cozinha, iluminação, lavagem e secagem. Esses eletrodomésticos estão começando a se tornar inteligentes, com recursos de conectividade que lhes permitem ser automatizados, a fim de aproveitar as vantagens que a medição inteligente e tarifas variáveis podem trazer.

Em termos atuais uma HAN consiste, então, em uma rede dedicada à conexão de dispositivos, tais como monitores de energia, dispositivos de controle de carga e aparelhos inteligentes, de forma transparente para o sistema de medição inteligente global, com possibilidade de monitoramento e controle.

Nesse contexto as HANs tem a capacidade de impulsionar uma mudança permanente na forma como o consumo de energia é percebido pelos consumidores.

A Figura 4 - Arquitetura de uma HAN mostra a arquitetura de uma HAN onde o consumidor exerce controle sobre os dispositivos.

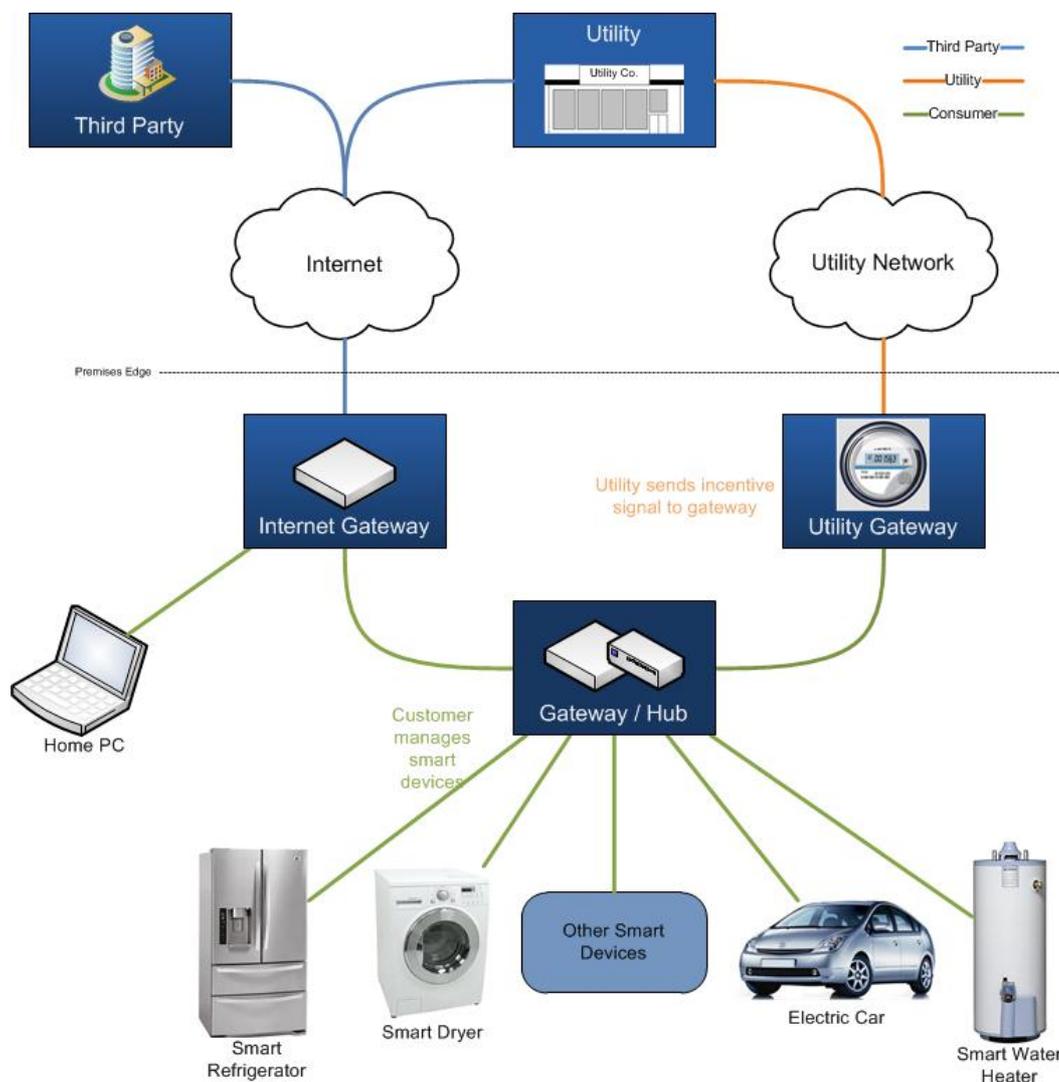


Figura 4 - Arquitetura de uma HAN

### 3.2. Home Energy Monitors

Apesar das inúmeras vantagens associadas, os contadores inteligentes e as HANs são sistemas de monitorização ainda não largamente acessíveis, por serem complexos, de difícil utilização para o consumidor e bastante caros. Para o consumidor é mais prático utilizar um sistema de monitorização que seja fácil de

instalar e utilizar e que apresente alguma flexibilidade. Hoje em dia, muitos destes sistemas já são comercializados e estão acessíveis à maioria da população.

Os *home energy monitors* foram desenvolvidos exclusivamente para ajudar o consumidor a controlar e reduzir os seus consumos. Além disso, são portáteis, mais simples e mais baratos que os contadores inteligentes, e conseguem medir e tratar os consumos elétricos em tempo real, mas não substituem o contador tradicional.

Dependendo da sua sofisticação, podem ainda se comunicar com um computador ou com um dispositivo móvel, como celular ou *tablet*, distribuir os dados por toda a casa com recurso à comunicação sem fios ou enviá-los pela internet permitindo assim o monitoramento à distância.

Existem monitores de energia destinados a monitorar o consumo total da residência - que ficam localizados junto ao medidor eletromecânico ou ao quadro elétrico - e existem os medidores chamados *plug-in*, cujo objetivo é medir o consumo de aparelhos individualmente, esses medidores ficam localizados entre a tomada de fornecimento de energia e o aparelho do qual se deseja medir o consumo (Josué, 2010).

### **3.3. Sistemas para Medição de Consumo de Eletrodomésticos**

Como dito a princípio, a informação mais eficaz para o consumo eficiente é a quantidade de energia que está sendo consumida por cada eletrodoméstico, de uma forma que o consumidor possa entender, como o valor do consumo em dinheiro.

Essa sessão tem como objetivo listar alguns exemplos de sistemas destinados à medição de consumo de eletrodomésticos individualmente.

#### ***Kill A Watt***

O Kill a Watt é um dispositivo desenvolvido pela empresa P3 International, do tipo de sistema *plug in*. Possui um display LCD no qual são mostradas medidas relativas ao consumo de energia do equipamento elétrico ao qual está conectado, entre elas: Volts, Amperes, Watts, Hertz, Volt-Amperes ou

Kilowatts-hora. Essas medidas permite, além de analisar o consumo de um eletrodoméstico, fazer uma análise da qualidade da energia recebida. Na Figura 5 é mostrado o modelo P4400 (Weems Creek Solutions, 2012).



Figura 5 - Kill a Watt

A empresa fabrica também o Kill a Watt Graphic Timer P4480 que além de medir e monitorar os consumos de energia eléctrica, pode também ser programado para ligar/desligar o equipamento ao qual estiver ligado, o que ajuda a reduzir o consumo. Esse dispositivo é mostrado na Figura 6 (Weems Creek Solutions, 2012).



Figura 6 - Kill a Watt Graphic Timer P4480

### **Plogg**

O Plogg é um sistema simples e prático, também ligado entre a tomada e o eletrodoméstico, que envia dados de energia através de transmissão Zigbee ou

Bluetooth para um computador ou celular. Além dos habituais dados de energia, é capaz de medir também a potência reativa. Pode ser vendido com um sensor de corrente externo, que possibilita a medição de corrente de um circuito, tornando possível monitorar também o consumo da casa como um todo (Josué, 2010).

O dispositivo é ilustrado na Figura 7:



Figura 7 - Plogg

### *Power-Mate*

O Power-Mate, desenvolvido pela empresa australiana CCI, assim como o Kill-a-Watt possui um visor que disponibiliza os diversos dados de energia medidos, incluindo potência ativa e reativa. Além disso, o dispositivo apresenta uma estimativa das emissões de CO<sub>2</sub> resultantes do consumo de energia.

Sua principal característica é a elevada resolução e sensibilidade, o que permite medições de 0,001 A e de 0,1 W. A versão mais recente possui interface com o computador para armazenamento e análise dos dados de energia (CCI - Computer Control Instruments, 2012).

O dispositivo é ilustrado na Figura 8.



Figura 8 - Power-Mate

### *Power Meter*

O Power Meter é mais um dispositivo do tipo *plug-in* que promete ser uma forma de obter informações sobre consumo de energia de forma precisa e fácil de entender.

É capaz de: medir o consumo de um aparelho em uma faixa de 1 a 2.400 W; de informar o consumo em Kilowatts-hora; de informar o quanto está sendo gasto em dinheiro, se informada a tarifa da energia elétrica; e de medir tensão, fator de potência atual e a frequência.

O dispositivo, ilustrado na Figura 9, possui ainda um *timer* embutido que controla o tempo de utilização de um aparelho (Steplight, 2012).



Figura 9 - Power Meter

### *Watts Up?*

O Watts Up? também é um dispositivo que fica entre a tomada e o aparelho do qual se quer medir o consumo de energia. O modelo básico mede tensão e corrente milhares de vezes por segundo para garantir um tempo de resposta incrivelmente rápida que permita ver o “pico de energia” de quando os aparelhos são ligados pela primeira vez. O dispositivo é capaz de medir a potência real e o fator de potência. O display mostra, além do consumo, a porcentagem de tempo que o esse consumo está acima de um limiar predefinido, o que pode ajudar a identificar quando um aparelho está com defeito. O medidor é ilustrado na Figura 10.



Figura 10 - Watts Up?

Além desse é vendido o modelo PRO, que é capaz de armazenar dados de consumo e possui uma interface USB para armazenamento desses dados em um computador; o modelo PRO ES que permite armazenar quatro vezes mais informação que o modelo PRO; e o modelo .Net que permite monitoramento remoto via internet (Watts Up Meters, 2012).

### AlertMe

O AlertMe é uma plataforma que cria uma HAN que conecta o usuário a sua casa, energia e dispositivos, dando visibilidade e controle em tempo real de qualquer lugar, a qualquer momento (AlertMe, 2012).

A plataforma, como mostra a Figura 11, consiste em um hub que se comunica, via wireless, tanto aos dispositivos que fazem parte da plataforma quanto aos dispositivos de terceiros habilitados.

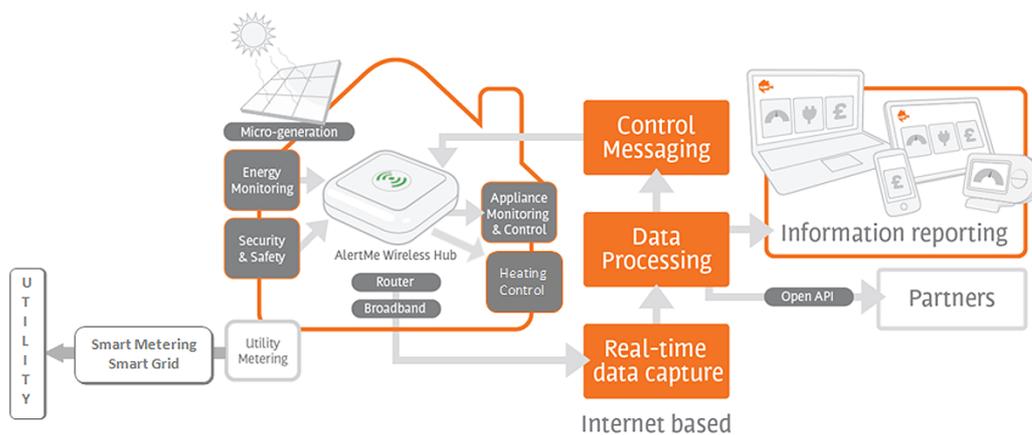


Figura 11 - Arquitetura da Rede Formada pelo AlertMe

As informações fornecidas pelo sistema vão além de dados de consumo: são fornecidas análises poderosas, de forma acessível e personalizável. A

plataforma é capaz de identificar eletrodomésticos individuais, analisar seu desempenho e fornecer recomendações personalizadas.

Essas informações são disponibilizadas aos usuários de várias formas, como mostra a Figura 12. O monitor com display colorido mostra o consumo em tempo real, por hora, por dia, por semana ou por mês. Através da plataforma online é possível ainda prever custos e programar metas de consumo.



Figura 12 - Formas de Monitoramento Fornecidas pelo AlertMe

O monitoramento de eletrodomésticos é feita através dos SmartPlugs, dispositivos do tipo *plug-in* mostrados na Figura 13. Esses dispositivos também permitem ligar ou desligar os eletrodomésticos a eles ligados, inclusive via celular.



Figura 13 - SmartPlug

### **Snapgrid**

O Snapgrid, mostrado na Figura 14, é um gerenciador de consumo energético composto por um painel *touchscreen* e uma CPU de 16 canais – sendo que cada canal recebe pastilhas individuais de medição. Cada pastilha mede o consumo do disjuntor associado, informando à CPU principal (iHouse, 2012).



Figura 14 - Snapgrid

Dessa forma, instalado na porta do quadro de disjuntores da residência, o dispositivo monitora 24 horas por dia o gasto de energia elétrica de ambientes ou equipamentos pré-determinados pelo usuário que possuem um disjuntor independente.

O consumo pode ser exibido para o consumidor em Kilowatts-hora ou em dinheiro de três formas diferentes: modo instantâneo, que informa o consumo no exato momento da consulta, sendo atualizado a cada um minuto; opção acumulado, que mostra soma do consumo, iniciado após a leitura pela empresa concessionária de energia elétrica até a data de consulta; ou como previsão para o mês, com estimativa mensal baseada no consumo médio dos últimos dias. Além disso, o Snapgrid também pode exibir o relatório de consumo dos últimos 12 meses.

É possível visualizar ainda a lista de ambientes ou equipamentos que mais consomem ou vêm consumindo energia elétrica. A Figura 15 detalha as informações que são mostradas na tela do equipamento.

**256,50**  
É a soma do consumo de todos os canais.

**R\$ & KW**  
O consumo pode ser apresentado em valor monetário ou quilowatts.

**Modos de Exibição do Consumo**  
São três as opções de exibição de consumo: acumulado, instantâneo e a previsão mensal.

Ch	EQUIPAMENTO	R\$
07	Maquina Lavar Louca	16,2
08	Ilum. Tomada Suite	12,0
09	Maquina Secar Roupa	8,40
10	Ilum. Tom.Quart.Filh	7,50
11	Ilum. Area Servico	5,40
12	Ilum. Tom. Sl. Estar	4,20

**Lista de itens**  
O Snapgrid monta uma lista dos equipamentos que mostra os de maior consumo primeiro e vai descendo aos de menor consumo. Essa lista pode ser rolada, verticalmente, do primeiro até o último canal existente.

**Meses anteriores**  
Os meses anteriores podem ser consultados facilmente através da rolagem horizontal.

Tela do Snapgrid

Figura 15 - Display do Snapgrid

O produto ainda traz o opcional de acesso a relatórios via Internet, exibidos em forma de gráficos coloridos e de fácil compreensão, os quais mostram o consumo por ambiente e por equipamento durante o mês, no dia-a-dia, ou destaca os pontos de maior consumo de energia elétrica, como mostra a Figura 16.

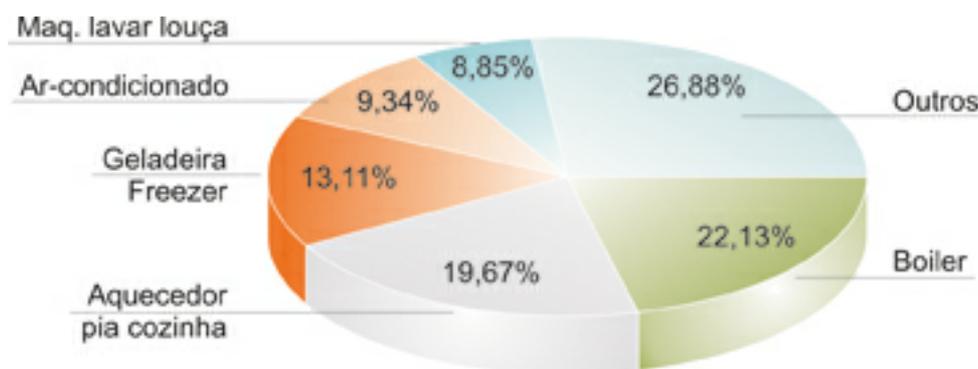


Figura 16 - Gráfico Gerado pelo Snapgrid

### *ElectriSense*

O *ElectriSense*, proposto em um artigo intitulado *ElectriSense: Single-Point Sensing Using EMI for Electrical Event Detection and Classification in the Home*, publicado em 2001 por Sidhant Gupta, Matthew S. Reynolds e Shwetak N. Patel, um único dispositivo que, conectado em qualquer ponto de energia da casa, é capaz de detectar e classificar dispositivos eletrônicos.

O dispositivo, em uma das etapas do seu desenvolvimento, é mostrado na Figura 17.

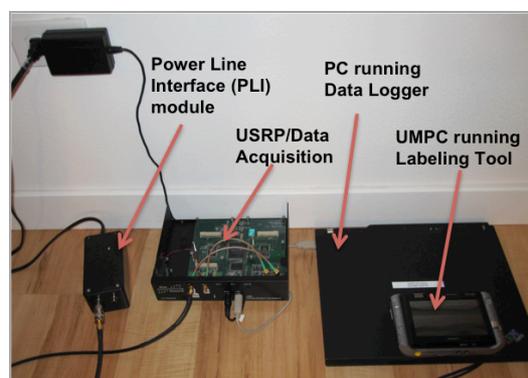


Figura 17 - *ElectriSense*

O funcionamento do sistema se baseia no fato de que a maioria dos eletrodomésticos e lâmpadas fluorescentes empregam SMPS<sup>6</sup> (*Switched-Mode Power Supply*) para melhorar sua eficiência. Estas fontes de alimentação geram, durante a sua operação, uma interferência eletromagnética de alta frequência (EMI) contínua que se propaga por toda a rede elétrica.

Os autores comprovam por meio de experimentação que esses sinais EMI são estáveis, previsíveis e específicos para o circuito de um dispositivo, e mantém suas propriedades consistentes em qualquer residência. Assim, pode-se dizer que os eletrodomésticos possuem uma assinatura, que é lançada na rede elétrica durante a sua operação.

Os dados fornecidos pelo ElectriSense podem ser usados por numerosas aplicações de forma a identificar o consumo de cada eletrodoméstico sem a necessidade de instalar um medidor para cada equipamento. Associado a um produto com tecnologia wifi, o sistema pode se comunicar com um display, ou mesmo com o computador ou celular, e fornecer informações sobre o consumo de energia atual (Gupta, et al., 2010).

A Figura 18 mostra uma interface para o ElectriSense.



Figura 18 - Interface do ElectriSense

---

<sup>6</sup> [http:// www.smeps.us/](http://www.smeps.us/)

Em seu artigo publicado em 2010 intitulado *Appliance Recognition and Unattended Appliance Detection for Energy Conservation*, Shih-chiang Lee, Gu-yuan Lin, Wan-rong Jih e Jane Yung-jen Hsu definem um framework que consiste em quatro modelos de processo:

- O reconhecimento dos estados de funcionamento dos eletrodomésticos a partir de dados brutos da medição de energia elétrica;
- A associação de eletrodomésticos a atividades dos habitantes de uma residência de acordo com dados do *Open Mind Common Sense Project*<sup>7</sup>.
- A identificação dos equipamentos que estão consumindo energia, mas não estão associados a nenhuma das atividades dos usuários, e que estão, portanto, desperdiçando energia elétrica;
- A disponibilização de serviços de conservação de energia com base em notificações de consumo.

Em termos gerais, o sistema coleta informações de energia elétrica a partir dos medidores convencionais e reconhece os estados dos eletrodomésticos em tempo real, levando em conta o comportamento do usuário para melhorar a precisão desse reconhecimento; consegue identificar aparelhos que estão desperdiçando energia elétrica; e fornece informações do custo de uso de um aparelho, em potência e em dinheiro, também em tempo real (Lee, et al., 2010).

A Figura 19 mostra o dispositivo instalado junto ao quadro elétrico de uma residência.

---

<sup>7</sup> <http://openmind.media.mit.edu/>

### 3.4. Comparação entre formas de medição

Nessa seção é feita uma comparação entre todos os sistemas de medição descritos na seção anterior, com base nos seguintes critérios:



Figura 19 - Dispositivo Desenvolvido por Lee et al

- O dispositivo possui um display para visualização dos dados de consumo;
- As informações são mostradas de forma amigável ao usuário;
- O dispositivo permite monitoramento remoto;
- O dispositivo permite controle automático dos equipamentos;
- O dispositivo permite armazenamento dos dados de consumo;
- O dispositivo informa o consumo em períodos definidos (diariamente, semanalmente, mensalmente, etc.);
- O dispositivo fornece informações detalhadas sobre o consumo de energia (valores de tensão, corrente, potência real, potência aparente, fator de potência);
- O dispositivo fornece o valor consumido em dinheiro;
- Identificação de falhas nos eletrodomésticos;
- Identificação de desperdício de energia;
- O monitoramento é feito por um único dispositivo;
- O dispositivo possui formas de incentivo e conscientização ambiental.

A comparação é mostrada na Tabela 3.1:

Tabela 3.1 - Comparação entre dispositivos para medição de consumo de eletrodomésticos

	Kill A Watt	Plogg	Power- Mate	Power Meter	Watts Up?	AlertMe	Snapgrid	ElectriSense	Lee et al
<b>Display</b>	✓		✓	✓	✓	✓	✓		✓
<b>Interface amigável</b>						✓	✓		
<b>Monitoramento remoto</b>		✓			✓	✓	✓		
<b>Controle automático</b>	✓					✓			
<b>Armazenamento do consumo</b>			✓		✓	✓	✓		
<b>Consumo periódico</b>							✓	✓	
<b>Detalhes de consumo</b>	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		
<b>Consumo em dinheiro</b>			✓			✓	✓		✓
<b>Identificação de falhas</b>					✓				
<b>Identificação de desperdício</b>									✓
<b>Único dispositivo</b>							✓	✓	✓
<b>Conscientização ambiental</b>			✓			✓			

## 4. Modelo Proposto

Tecnologias para monitoramento do consumo em nível de eletrodomésticos, a partir de um único ponto, apresentam inúmeras vantagens em relação aos dispositivos do tipo *plug-in*, as quais incluem menor custo, facilidade de instalação e menor intrusividade. No entanto, esse tipo de detecção é limitada fundamentalmente pela quantidade e qualidade da informação que pode ser medida a partir de um único ponto na infraestrutura elétrica da casa.

As abordagens para identificação de dispositivos a partir de um único ponto podem ser classificadas em três grupos: abordagens baseadas na potência consumida, no consumo de corrente e características de inicialização, e em assinaturas de tensão (Froehlic, et al., 2011).

- As abordagens baseadas no consumo de corrente baseiam-se no fato de que os dispositivos consomem corrente de formas particulares. Assim, existem duas formas de classificar dispositivos através da análise da corrente. A primeira delas usa a magnitude da corrente -  $|I_{AC}|$ . Uma vez que muitas cargas apresentam consumo de corrente nos harmônicos de 60 Hz é possível determinar “assinaturas de corrente” identificando características em cada harmônico individual. A segunda forma analisa a magnitude do consumo inicial em um tempo fixo, normalmente 100 a 500 ms.
- As abordagens baseadas em consumo de tensão tem como base a interferência gerada pelos dispositivos na rede elétrica, que deformam a senóide de 60 Hz. Esses ruídos consistem em assinaturas mensuráveis e características de cada dispositivo.
- Por fim, as abordagens baseadas no consumo de potência. Eletrodomésticos consomem dois tipos de potência: potência real (consumida por cargas resistivas) e potência reativa (consumida por cargas indutivas). A potência total consumida por um dispositivo é formada pela potência real mais a potência reativa. A

identificação de aparelhos se dá através do mapeamento da potência consumida em um plano 2D, como mostra a Figura 20.

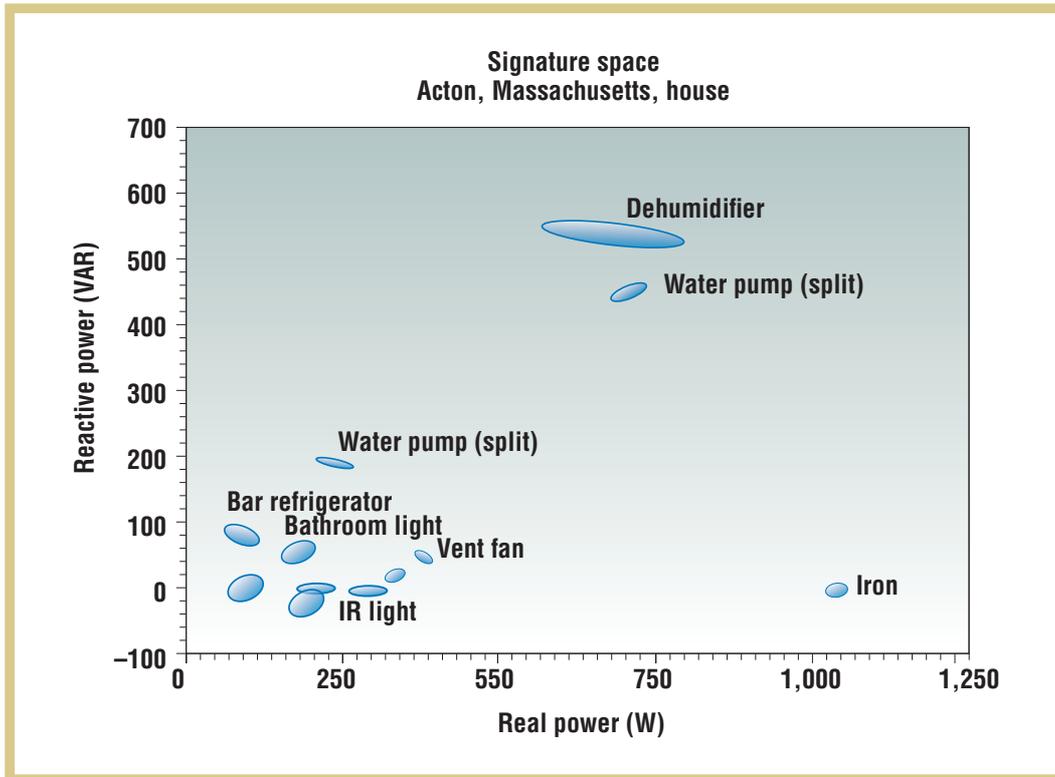


Figura 20 Mapeamento de Potência

A melhor forma de identificação é conseguida por meio de uma combinação das abordagens apresentadas.

Diante do exposto, o objetivo desse trabalho, além de dar uma visão geral da área de *Smart Grid* e monitoramento doméstico, é desenvolver um dispositivo (um *home energy monitor*) capaz de efetuar medições e fornecer as informações sobre o consumo de energia necessárias para a detecção de eletrodomésticos. Não está no escopo proposto, devido ao curto período disponível para a implementação, efetuar as análises dos dados coletados para identificar os equipamentos, mas apenas obter as grandezas que permitem esta identificação.

#### 4.1. Descrição do Sistema

O sistema desenvolvido é capaz de medir e calcular, em tempo real, diversos dados de energia, tais como tensão, corrente, potência ativa, e fator de

potência, energia consumida e os custos. É constituído por um dispositivo de hardware responsável pela medição, e um software que disponibilize esses dados para uma aplicação que vá identificar os equipamentos ligados à rede.

O trabalho foi iniciado com a pesquisa de componentes que pudessem ser usados para efetuar a medição de energia. Foi escolhido o CI CS463, da Cirrus Logic, por ser um componente fácil de programar e um dos poucos que mede fator de potência.

O chip CS5463 integra dois Conversores Analógico-Digitais Sigma-Delta (Torres, et al., 2006) uma máquina para cálculos matemáticos, um conversor energia-frequência e uma máquina serial de interface. A principal aplicação sugerida para o CI é a medição de potência e energia em sistemas de alimentação.

O CI disponibiliza, para a interface com o circuito, um canal referente à tensão e outro à corrente. Sua operação se baseia num processo de aquisição, processamento matemático e atualização de registradores acessíveis externamente pela comunicação serial. Com este componente, têm-se disponíveis diretamente as seguintes medidas:

- Valor instantâneo da tensão, corrente e potência;
- $V_{RMS}$ ,  $I_{RMS}$ ;
- Potência ativa, reativa e aparente;
- Potência ativa fundamental e potência ativa harmônica;
- Potência reativa fundamental;
- Fator de potência;
- Frequência;
- Temperatura.

Os dados relativos ao consumo são enviados ao computador onde são exibidos por meio de uma interface gráfica.

#### **4.1.1. Estrutura Geral do Hardware de Medição**

De uma forma geral, o dispositivo foi projetado segundo o diagrama mostrado na Figura 21.

O dispositivo de aquisição de dados começará por ler os sinais de tensão e corrente por meio de sensores. Os sinais lidos serão então condicionados de forma a ajustá-los aos níveis exigidos pelo medidor. Esse, por sua vez, medirá os dados de energia e transmitirá essa informação ao Arduino, uma plataforma de prototipagem eletrônica *open-source*, com um microcontrolador de oito bits, que é explicada em detalhes na próxima subseção. O Arduino, por fim, calculará a energia consumida e enviará para um computador.

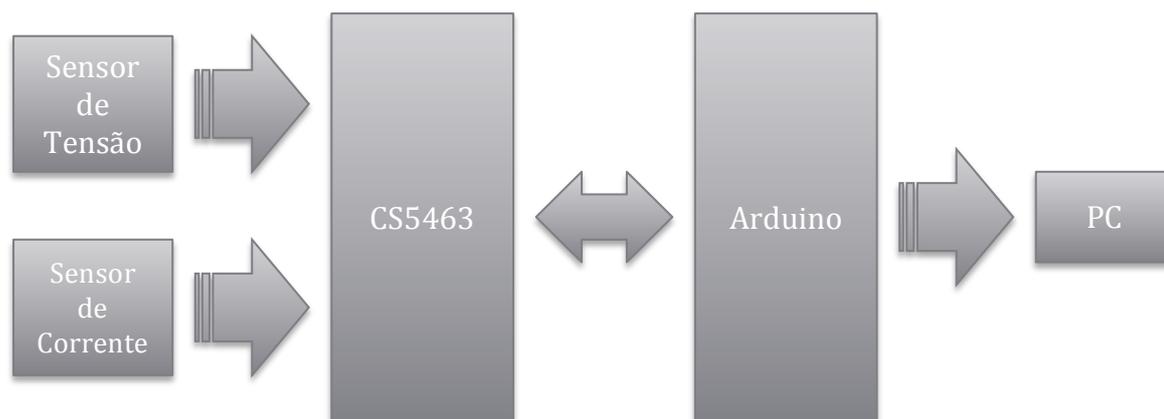


Figura 21 - Estrutura do Medidor Proposto

### **Arduino**

O Arduino, ilustrado na Figura 22 é uma plataforma de prototipagem eletrônica de hardware livre, projetada com um microcontrolador Atmel AVR de placa única, com suporte de entrada/saída embutido, e uma linguagem de programação padrão que é essencialmente C/C++ (Arduino, 2012).

Alcançou um enorme sucesso ao longo do tempo em virtude do seu baixo custo, simplicidade na utilização e possibilidade de utilização em vários sistemas operacionais.

#### Hardware

Sua placa consiste em um microcontrolador Atmel AVR de 8 bits, com componentes complementares para facilitar a programação e incorporação em outros circuitos. Os Arduinos originais utilizam a série de chips *megaAVR*, especialmente os *ATmega8*, *ATmega168*, *ATmega328* e *ATmega1280*.

Um importante aspecto é a possibilidade de interligar o microprocessador a outros módulos, conhecidos como *shields*, que são capazes de estender as capacidades da placa.



Figura 22 - Arduino

#### *Microprocessador*

Um microprocessador, como mostrado na Figura 23, basicamente, é constituído por um circuito integrado com a capacidade de executar determinadas instruções, sendo a sua velocidade de processamento determinada por um circuito que produz um determinado *Clock* (kHz, MHz ou GHz).

O seu poder de processamento é afetado por características como Bits, quantidade de núcleos, arquitetura apresentada, tipo de instruções, entre outras. Como fator de grande importância tem-se ainda a existência de uma memória externa, onde estão armazenados os programas que serão executados.

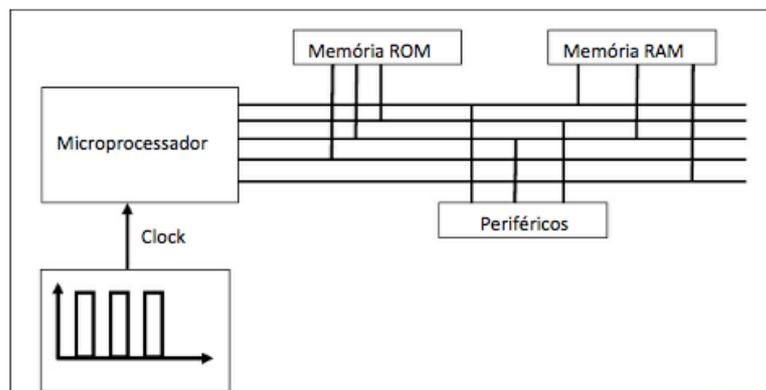


Figura 23- Microprocessador mais Periféricos

### Microcontrolador

Um microcontrolador ( $\mu\text{C}$ ) é um microprocessador que conta com alguns periféricos, como: memórias, estruturas de interrupção, sistemas de comunicação, conversores analógico/digital e digital/analógico, contadores e *timers*, todos em um mesmo componente (Ransan, 2011).

Um microcontrolador, mostrado na Figura 24, ao contrário de um microprocessador, é desenhado e construído de forma a integrar diversos componentes num único circuito integrado, evitando, assim, a necessidade de adicionar componentes externos.

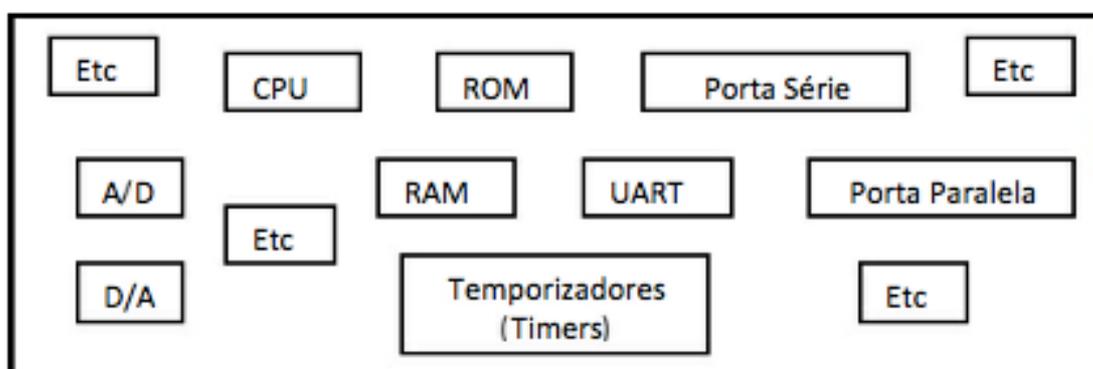


Figura 24 - Microcontrolador

Na Figura 25 é apresentado um diagrama de blocos de um microcontrolador ATmega168 em que é possível identificar todos os seus constituintes.

### Pinout Disponível

Torna-se importante uma descrição das possibilidades em termos de *pinout* do Arduino, sendo uma representação esquemática possível para o Arduino Duemilanove a Figura 26.

Os pinos disponíveis são detalhados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Pinout do Arduino

<b>Pinos de I/O digitais</b>	14 (6 com <i>Pulse Width Modulation (PWM)</i> )
<b>Pinos analógicos</b>	6
<b>Pinos de <i>Ground (GND)</i></b>	3

<b>Pinos de 5 V</b>	1
<b>Pinos de 3.3 V</b>	1
<b>Pinos de <i>Analog Reference</i> (AREF)</b>	1
<b>Pinos de <i>reset</i> (RESET)</b>	1

É ainda importante ressaltar que a corrente máxima por cada pino analógico e digital é de 40 mA, à exceção da saída de 3.3 V, que permite correntes máximas de 50 mA.

A capacidade de utilizar *Pulse Width Modulation* (PWM), é muito importante, pois permite obter uma tensão analógica a partir de um sinal digital.

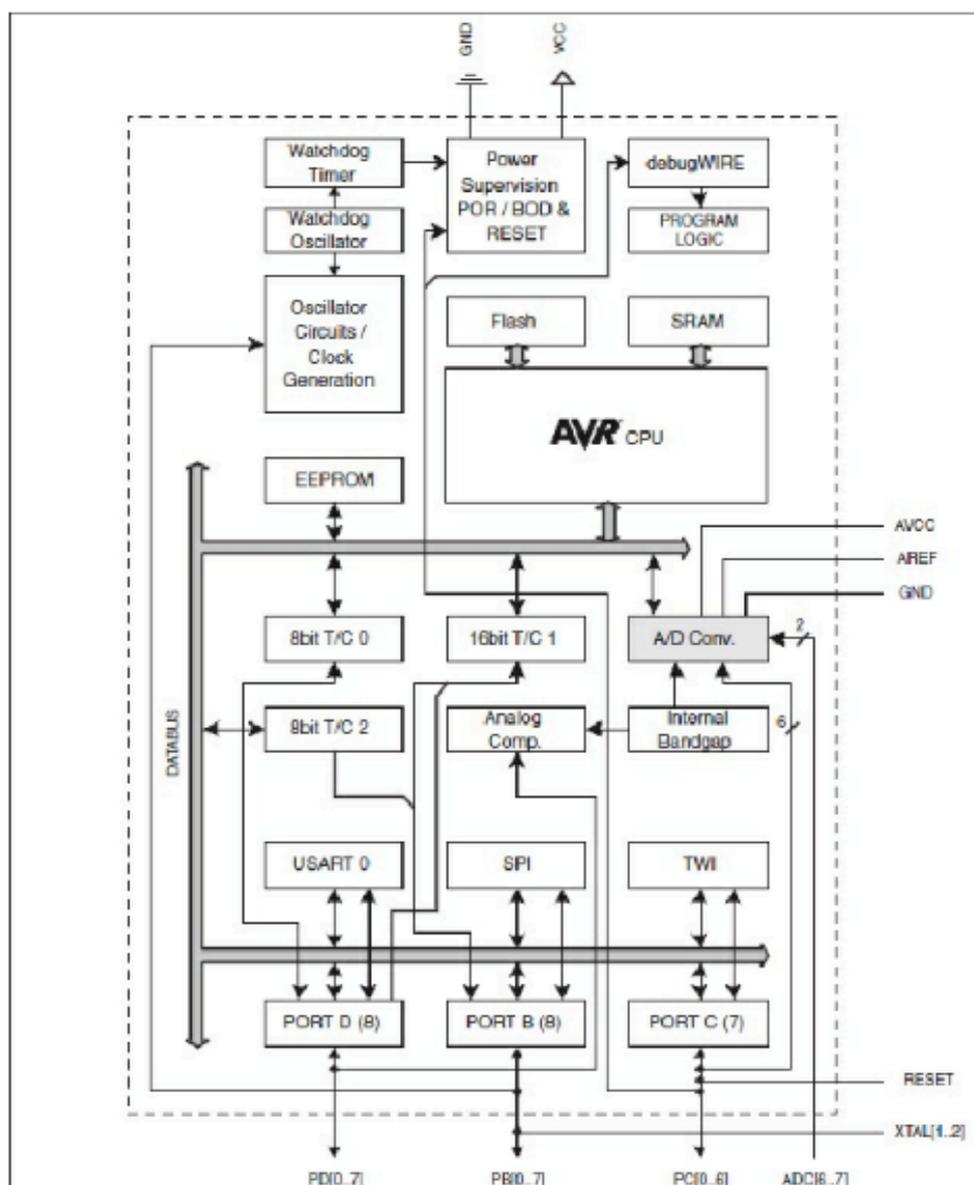


Figura 25 - Diagrama de Blocos do ATmega168

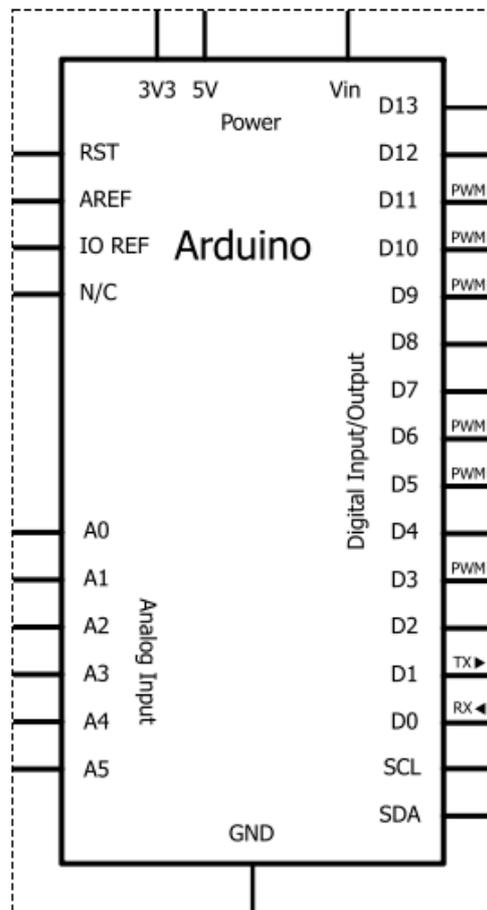


Figura 26 - Pinout do Arduino

## Software

O Arduino IDE, mostrada na Figura 27 é uma aplicação multiplataforma escrita em Java derivada dos projetos Processing<sup>8</sup> e Wiring<sup>9</sup>. Inclui um editor de código capaz de compilar e carregar programas para a placa com um único clique. Com isso não há a necessidade de editar *makefiles* ou rodar programas em ambientes de linha de comando.

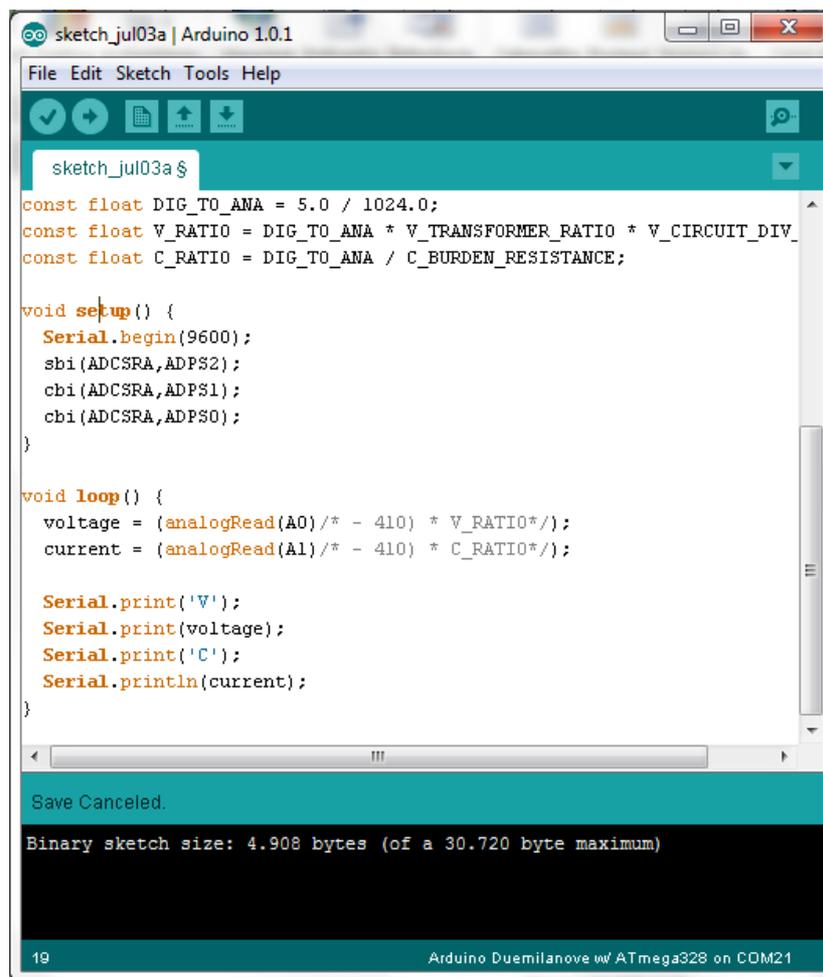
---

<sup>8</sup> <http://processing.org/>

<sup>9</sup> <http://wiring.org.co/>

## Ciclos de Desenvolvimento

Um resumo do ciclo de desenvolvimento pode ser visto na Figura 28, que demonstra os passos necessários para elaborar uma aplicação em Arduino de uma forma esquemática.



```
sketch_jul03a | Arduino 1.0.1
File Edit Sketch Tools Help
sketch_jul03a $
const float DIG_TO_ANA = 5.0 / 1024.0;
const float V_RATIO = DIG_TO_ANA * V_TRANSFORMER_RATIO * V_CIRCUIT_DIV_
const float C_RATIO = DIG_TO_ANA / C_BURDEN_RESISTANCE;

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  sbi(ADCSRA,ADPS2);
  cbi(ADCSRA,ADPS1);
  cbi(ADCSRA,ADPS0);
}

void loop() {
  voltage = (analogRead(A0)/* - 410) * V_RATIO*/);
  current = (analogRead(A1)/* - 410) * C_RATIO*/);

  Serial.print('V');
  Serial.print(voltage);
  Serial.print('C');
  Serial.println(current);
}

Save Canceled.
Binary sketch size: 4.908 bytes (of a 30.720 byte maximum)
19 Arduino Duemilanove w/ ATmega328 on COM21
```

Figura 27 - IDE Arduino

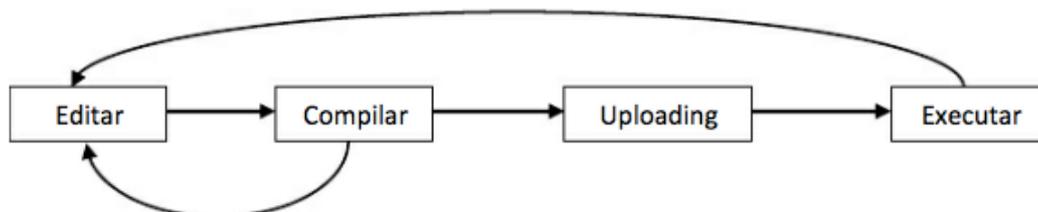


Figura 28 - Ciclo de Desenvolvimento de uma Aplicação

As funções básicas que precisam ser definidas para criar aplicações são as seguintes:

- *setup()* – Inserida no início, usada para inicializar a configuração. É executada uma vez e é normalmente utilizada para executar a inicialização de variáveis, a inicialização da utilização de bibliotecas, definição dos pinos, início do uso de comunicação serial, etc.
- *loop()* – chamada para repetir um bloco de comandos ou esperar até que seja desligada. Todos os comandos existentes no interior desta função são sucessivamente repetidos, o que pode permitir a leitura sucessiva de portas, de parâmetros provenientes de sensores externos e atuar de acordo com as condições estabelecidas, entre muitas outras aplicações.

## 4.2. Implementação do Sistema

A implementação do sistema teve início pelo desenvolvimento do *hardware* de medição, seguido pelo desenvolvimento de um *firmware* responsável pelo cálculo de potência. Por fim foi desenvolvida uma interface onde são mostradas todas as informações relativas ao consumo de energia.

### 4.2.1. Hardware

Por tratar-se de um chip com encapsulamento SSOP<sup>10</sup> o CS5463 precisaria ser adaptado para a utilização em *protoboards*. Não foi possível fazer essa adaptação em tempo hábil, portanto outra abordagem foi requerida.

Nessa nova investida as amostras de tensão e corrente são coletadas e os cálculos de potência e energia são realizados pelo microcontrolador. A nova arquitetura é mostrada na Figura 29.

---

<sup>10</sup> SSOP - *Shrink Small Outline Package*: Encapsulamento de alta densidade com terminais “Asa de Gaiivota” com corpo de 5.3 mm.

### *Aquisição de dados*

A implementação começa pela aquisição dos sinais de tensão e corrente. A Figura 30 mostra a forma como esses sinais são adquiridos.

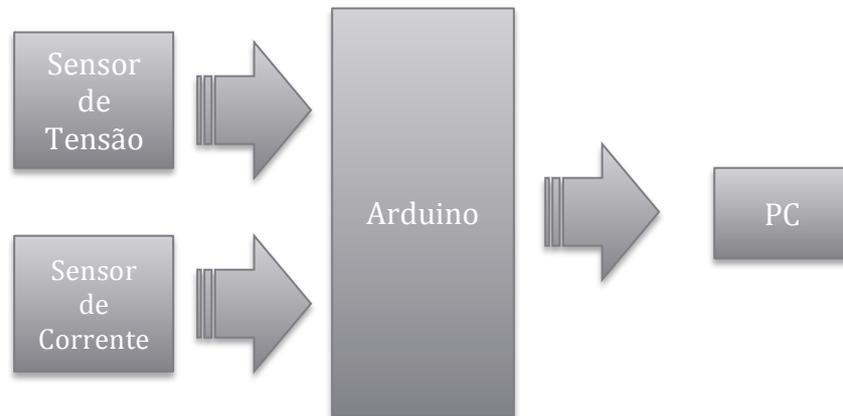


Figura 29 - Arquitetura do Protótipo

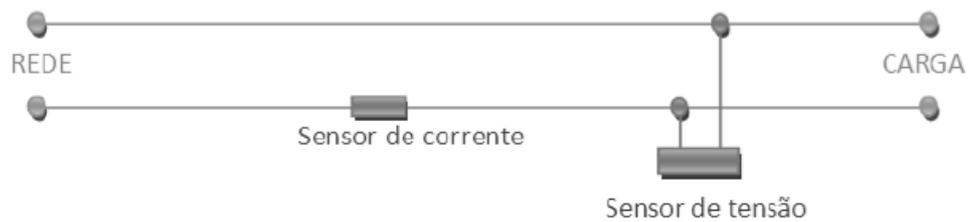


Figura 30 - Obtenção dos Sinais de Tensão e Corrente

Como pode ser observado, tanto o sensor de tensão quanto o de corrente estão localizados na rede elétrica, portanto em um sistema de alta tensão e de alta capacidade de fornecimento de corrente elétrica.

O Conversor Analógico-Digital do Arduino é capaz de receber entradas com valores entre 0 e 5V, e mapeá-las com uma resolução de 1024 bits. Por esse motivo, uma vez adquiridos, os sinais de tensão e corrente precisam ser condicionados para valores que possam ser digitalizados pelo Arduino.

## Leitura de Tensão

Para a aquisição do sinal de tensão foi usado um transformador de tensão comercial com valores nominais 220 V no primário e 12 V no secundário, ilustrado na Figura 31.

Dessa forma, após ser reduzida pelo transformador a tensão assume valores no intervalo [-12 V, 12 V], o que implica na necessidade de condicionar o sinal para que se encaixe no intervalo [0 V, 5 V] aceitável pelo Conversor AD do Arduino.

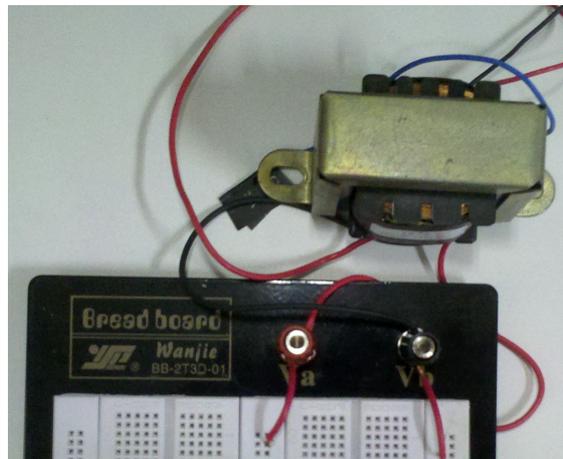


Figura 31 - Transformador de Tensão Utilizado no Circuito

Esse condicionamento é feito em duas etapas. Na primeira etapa um divisor de tensão resistivo é usado para reduzir o sinal para 2 V pico a pico. Como o sinal ainda assume valores negativos, é necessário que seja deslocado positivamente.

Na segunda etapa um divisor de tensão é utilizado no pino de 5 V do Arduino, de forma a determinar um *offset* de 2 V. Esse *offset* será somado ao sinal de 2 V obtido anteriormente, de forma a obter um sinal oscilando no intervalo [0 V, 4 V].

O circuito utilizado para a obtenção do sinal de tensão é mostrado na Figura 32.

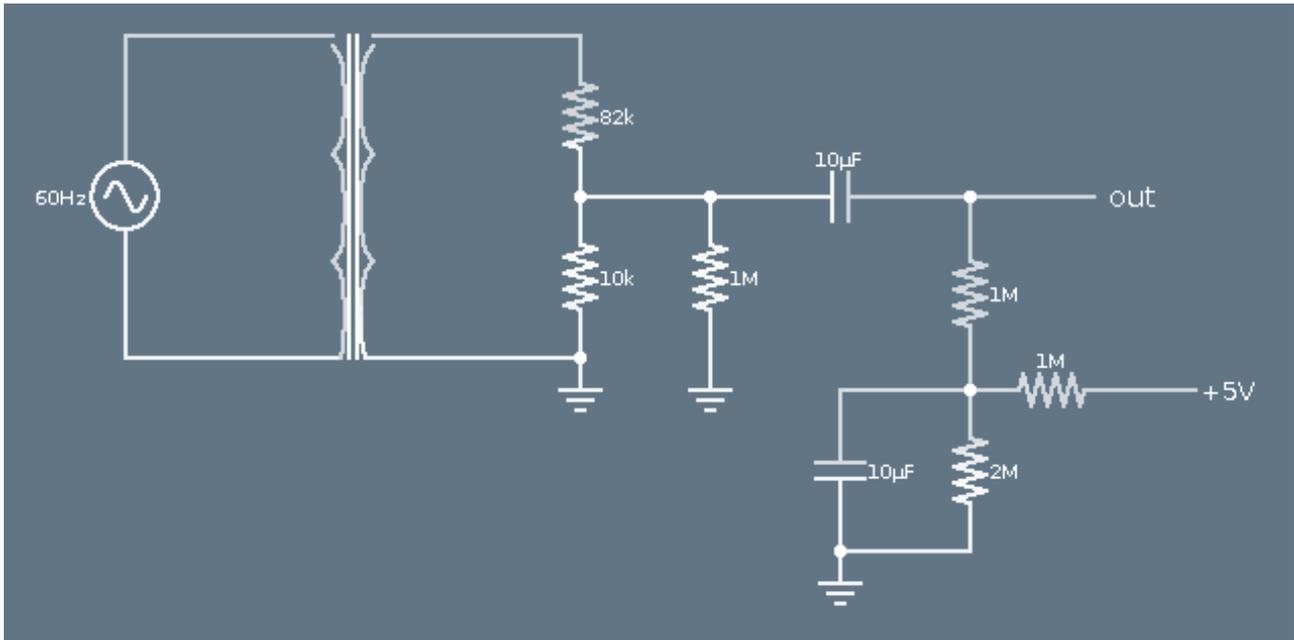


Figura 32 - Circuito para Condicionamento do Sinal de Tensão

#### Leitura de Corrente

De forma semelhante à obtenção do sinal de tensão, o sinal de corrente precisa ser condicionado para valores aceitáveis pelo Conversor AD do Arduino.

A medida de corrente é feita por meio de um medidor de baixo valor (1,5  $\Omega$ ) em série com a carga. A corrente é obtida pela lei de Ohm a partir da tensão medida nos terminais desse resistor.

A Figura 33 mostra como a resistência foi inserida entre a rede e a carga, por meio da adaptação de um filtro de linha.

Mais uma vez, um *offset* é somado à tensão de saída do sensor para deslocá-lo positivamente.

O circuito usado no condicionamento do sinal de corrente é mostrado na Figura 34.

Uma vez condicionados, os sinais são enviados ao Arduino através dos pinos A0 e A1.

O instrumento final é mostrado na Figura 35.

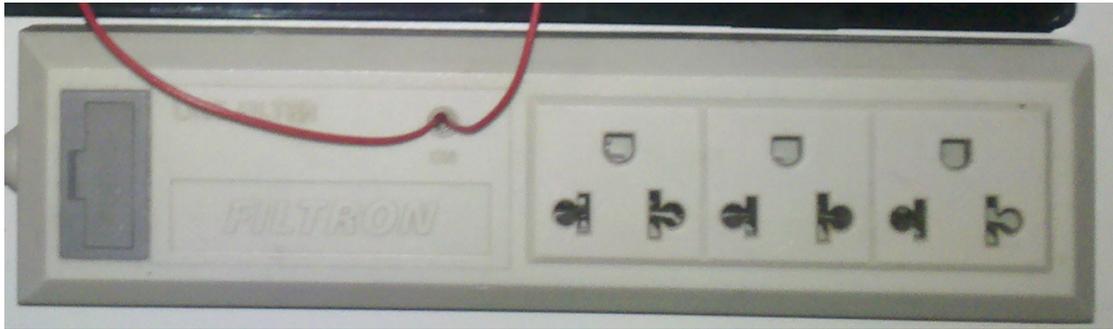
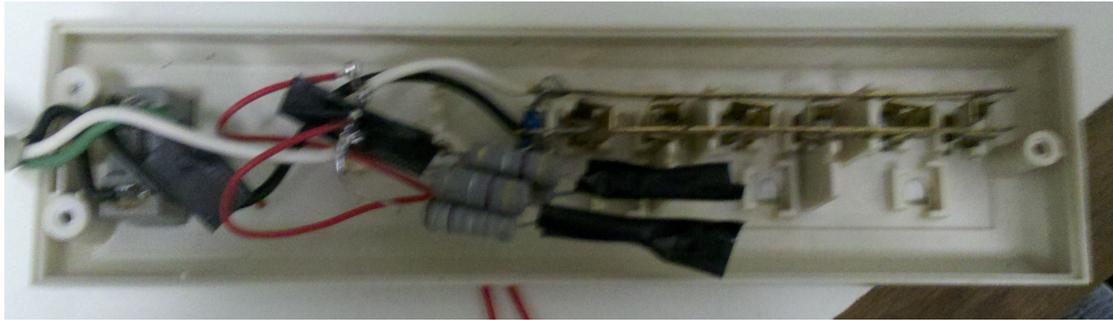


Figura 33 - Filtro de Linha Adaptado para Sensoriamento de Corrente

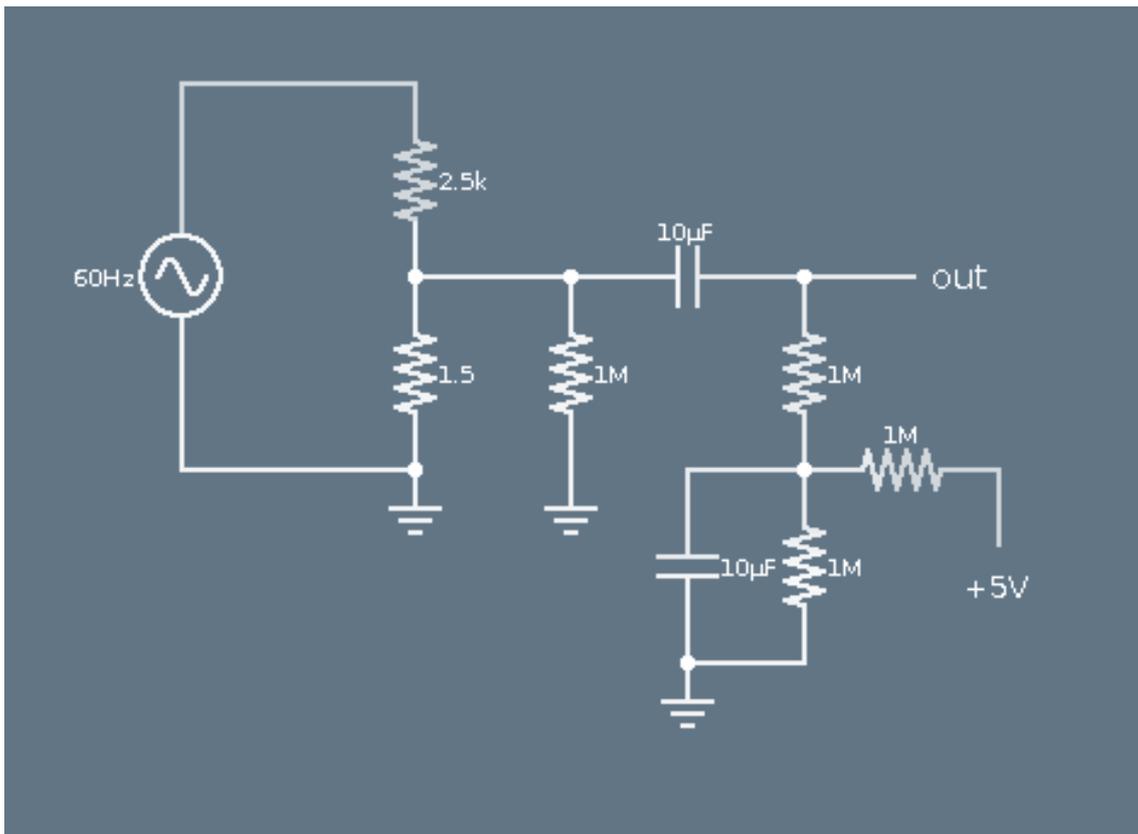


Figura 34 - Circuito para Condicionamento do Sinal de Corrente

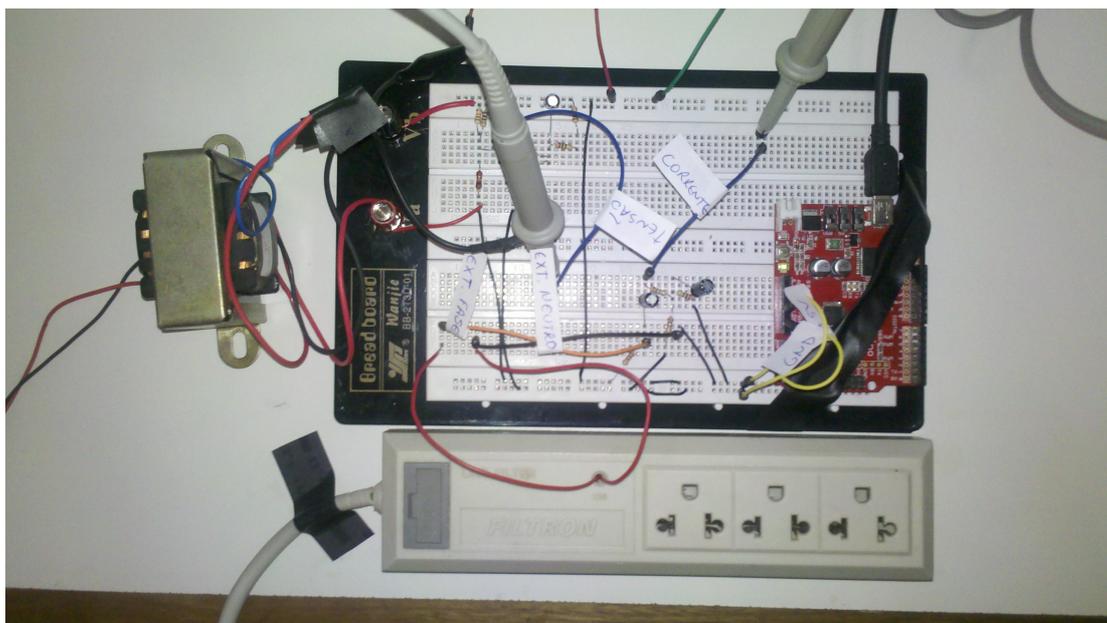


Figura 35 - Circuito Para Coleta de Amostras de Tensão e Corrente

#### 4.2.2. Firmware

A Figura 36 esquematiza o *firmware* desenvolvido para tratamento dos dados coletados.

De forma geral, a partir da obtenção dados de tensão e corrente, são calculados, pelo Arduino, os valores:

- Tensão RMS;
- Corrente RMS;
- Potência real;
- Potência aparente.

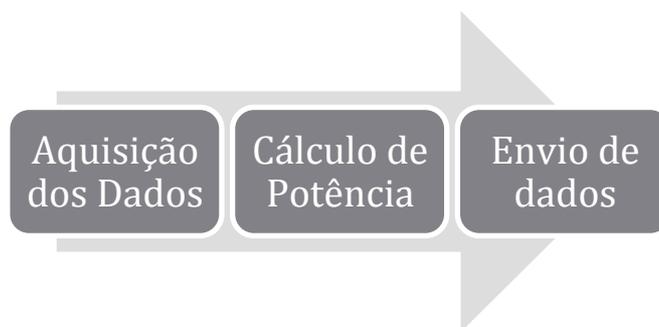


Figura 36 - Etapas Executadas pelo *Firmware*

Esses dados são então enviados a um computador onde são tratados via software.

As próximas seções detalham cada uma dessas etapas.

### *Coleta de dados*

O primeiro passo é a coleta das amostras de tensão e corrente. Nesse momento o principal ponto é a frequência em que as amostras são coletadas, uma vez que o objetivo é obter um dispositivo operando aproximadamente em tempo real.

Trabalhou-se para obter amostras a cada 0,05 ms, que corresponde a uma frequência de 20 KHz. Para chegar a esse valor foi necessário alterar o *clock* do Conversor AD do Arduino, que por padrão é de 125 KHz (Robot Plataform, 2012). Sabe-se que cada conversão analógico-digital é feita em 13 ciclos de *clock*, portanto tem-se uma frequência de 9.6 KHz.

O *clock* do ADC é definido como sendo uma fração do *clock* do processador por um fator denominado *pre scale* que assume valores em potência de dois que vão de 2 a 128, e pode ser alterado ajustando bits do registrador ADCSRA (Robot Plataform, 2012).

É possível, então, ajustar o fator *pre scale* para a obtenção da frequência desejada. A redução desse fator implica em perda de resolução pelo conversor, porém essa perda não é significativa para frequências até 1 MHz (Atmel, 2006). Dessa forma, o *pre scale* foi ajustado para 16, de forma que a frequência do ADC passa a ser 1 MHz.

### *Cálculo de Potência*

O *firmware* é responsável pelo cálculo das potências real e aparente. Como os sinais recebidos estão condicionados, é necessário retornar aos valores originais para efetuar o cálculo.

A partir dos valores de tensão e corrente originais são calculados a potência real, a tensão e a corrente RMS, a potência aparente e a potência reativa.

### *Envio de Dados*

Uma vez calculados, os dados são enviados ao computador através da porta serial, compactados em formato *string*.

#### **4.2.3. Software**

Foi desenvolvida, em linguagem Java utilizando bibliotecas do Processing<sup>11</sup>, uma interface para exibição dos valores referentes ao consumo de energia. Nessa interface são mostrados graficamente os valores:

- Tensão RMS;
- Corrente RMS;
- Tempo de amostragem;
- Fator de potência;
- Potência real;
- Potência reativa;
- Potência aparente;
- Energia consumida.

A aplicação recebe, via porta serial, os valores e tensão de corrente RMS, tempo de amostragem, potencia real e potencia aparente, e a partir deles calcula os demais valores.

A interface é mostrada na Figura 37.

#### **4.3. Resultados**

Uma vez montado o protótipo foram realizados alguns testes para validação do *hardware* e do *software*, eliminação de problemas iniciais e refinamento dos resultados.

Para a análise dos resultados é necessário um entendimento sobre o comportamento dos sinais de corrente e tensão para os diferentes tipos de carga.

---

<sup>11</sup> <http://processing.org/learning/eclipse/>



Figura 37 - Interface para Exibição dos Resultados

Com cargas puramente resistivas, como chuveiros e ferros de passar e lâmpadas, as ondas de tensão e de corrente elétrica estão em fase, mudando a sua polaridade no mesmo instante em cada ciclo, como ilustrado na Figura 38. Quando cargas reativas estão presentes, tais como capacitores e indutores, o armazenamento de energia nessas cargas resulta em uma diferença de fase entre as ondas de tensão e corrente, o que pode ser visto na Figura 39.

A maioria dos equipamentos eletrônicos, porém, não é composta apenas por resistências ôhmicas, indutâncias e capacitâncias. Por possuírem semicondutores, como diodos e transistores, ou ainda chaves manuais, estes equipamentos se tornam completamente não lineares, e distorcem a onda de corrente. A Figura 40 mostra as ondas de tensão e corrente para uma carga não linear.

#### 4.3.1. Teste do Hardware

O primeiro teste foi realizado utilizando um ferro de solda de 30 W de potência.

A Figura 41 mostra as curvas de tensão e corrente obtidas.

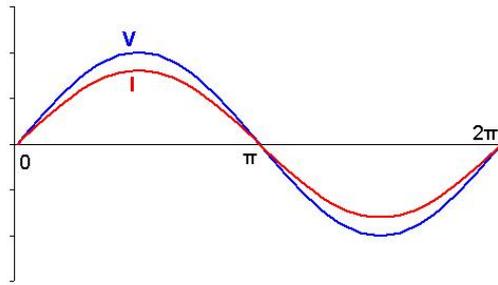


Figura 38 - Ondas de Tensão e Corrente de uma Carga Resistiva

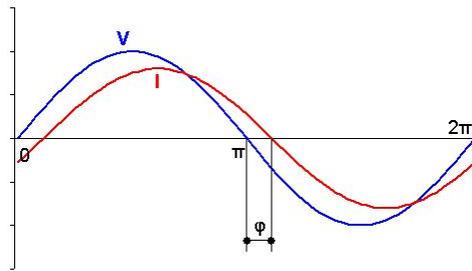


Figura 39 - Ondas de Tensão e Corrente de uma Carga Reativa

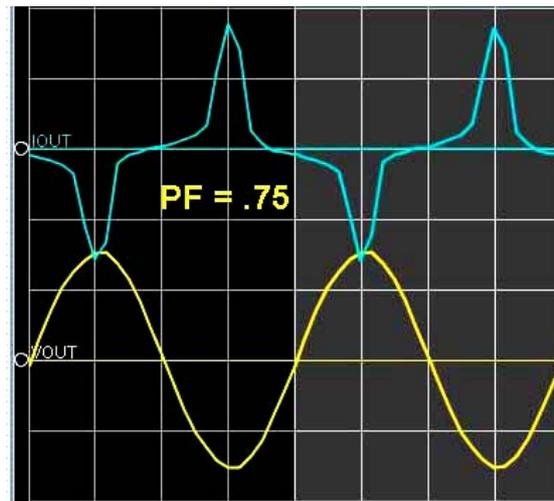


Figura 40 - Ondas de Tensão e Corrente de uma Carga Não Linear

A análise das curvas mostra que a tensão e a corrente estão em fase confirmando a presença de uma carga puramente resistiva.

Percebe-se que a curva de tensão varia no intervalo de 0 a 4 V, como foi definida na anteriormente. A segunda curva representa uma tensão de aproximadamente 200 mV pico a pico deslocada de 2 V, como projetado. Essa

tensão indica uma corrente de 136 mA, o que corresponde a corrente consumida pela carga de 30 W utilizada.

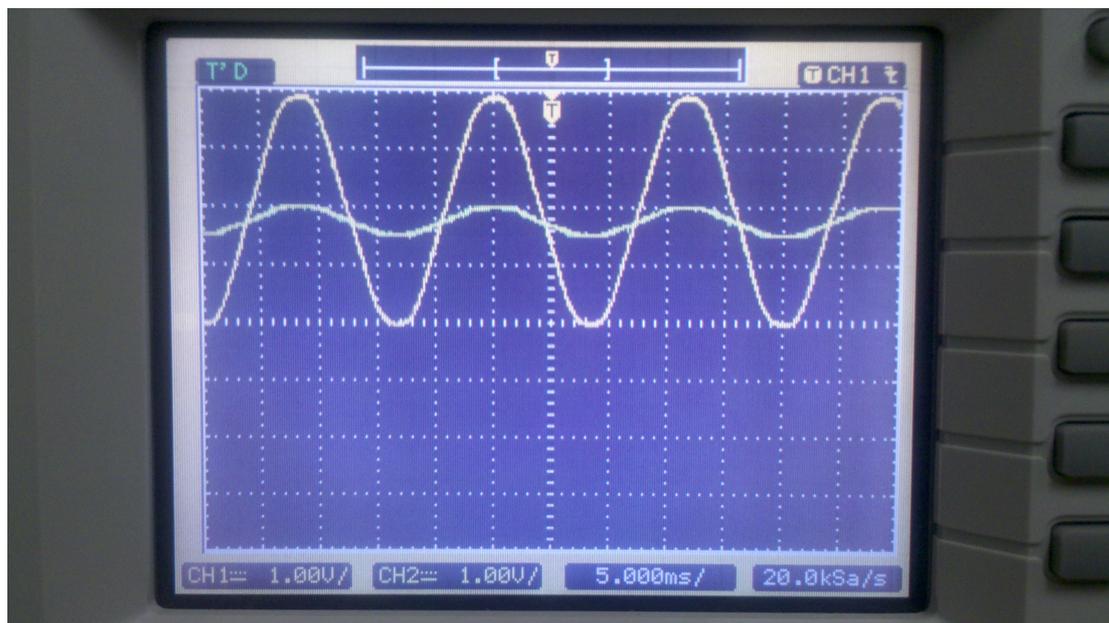


Figura 41 - Ondas de Tensão e Corrente do Primeiro Experimento

A Figura 42 mostra as curvas de tensão e corrente de um notebook ligado ao sistema.

A distorção na curva de corrente indica a presença de uma carga não linear, como esperado.

#### 4.3.2. Teste do Software

Uma vez validado o *hardware* foram realizados testes para validação do *software*. A Figura 43 mostra os valores exibidos quando não há carga ligada ao sistema.

Percebe-se um valor de tensão RMS muito próximo da tensão da rede elétrica e valores de corrente RMS, potência e consumo de energia muito próximos de zero, como esperado.

Ao ligar a rede uma carga resistiva foram obtidos os resultados mostrados na Figura 44, onde são mostradas as variações ocorridas no gráfico no momento em que uma carga é ligada ao sistema.

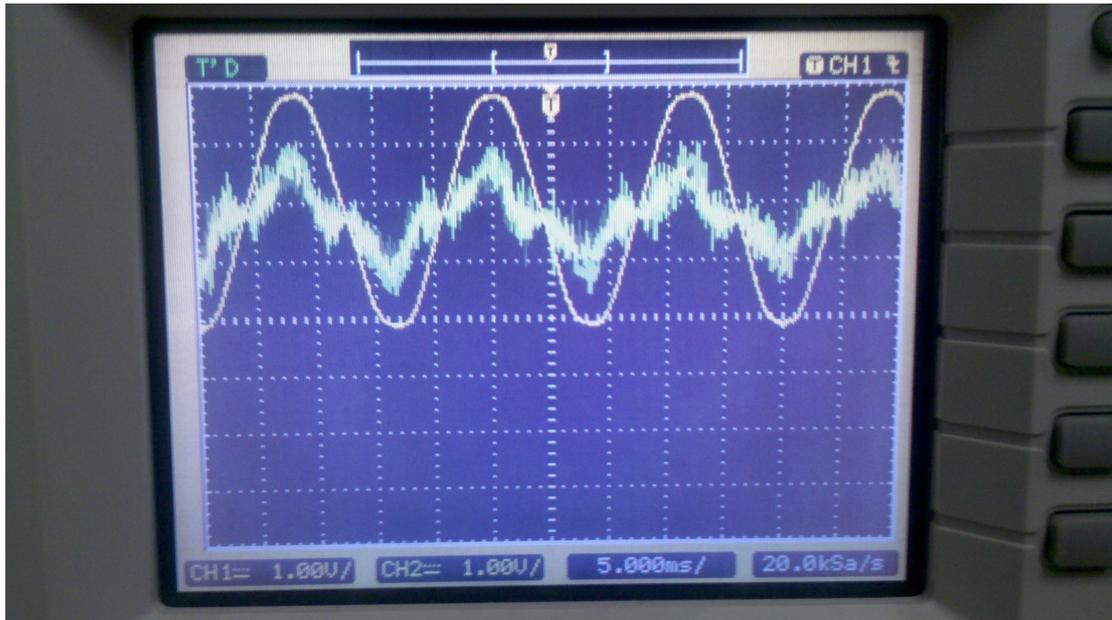


Figura 42 - Curvas de Tensão e Corrente do Segundo Experimento

Tensão RMS: 216,34 V	Corrente RMS: 0,01 A
Tamanho do bloco: 305 ms	Fator de potência: 0,09
Potência real: 0,12 W	Potência reativa: 1,4 VAR
Potência aparente: 1,41 VA	Energia consumida: 0 Wh

Figura 43 - Interface sem Cargas Ligadas ao Sistema

Os valores de tensão e corrente estão muito próximos aos valores nominais do equipamento. Nota-se o fator de potência equivalente à unidade, o que é esperado, conforme determinado pela legislação brasileira, que permite um valor mínimo de 0,92 para esse fator.

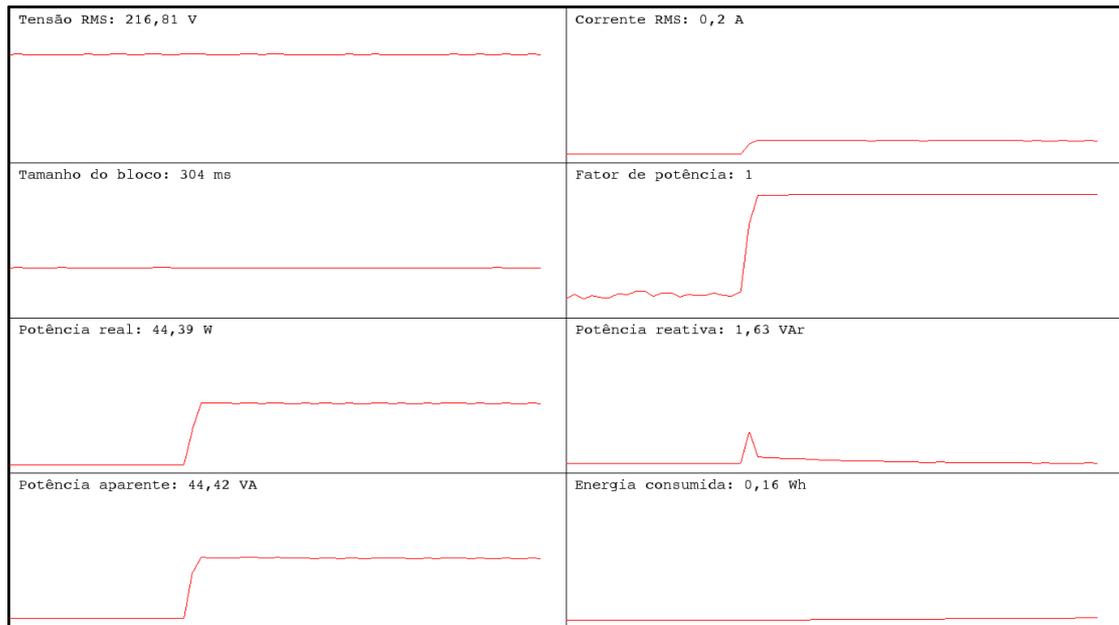


Figura 44 - Interface com uma Carga Resistiva Ligada ao Sistema

## 5. Dificuldades Encontradas

As principais dificuldades encontradas na elaboração desse relatório estão relacionadas à implementação da parte prática. Primeiro, para a obtenção dos sinais de tensão e corrente foram feitas várias abordagens.

Primeiro tentou-se determinar o *offset* para deslocamento positivo dos sinais através de um circuito somador de tensão utilizando amplificadores operacionais. Escolheu-se em vez disso o divisor de tensão por ser mais simples e menos custoso.

Em seguida, para obtenção do sinal de corrente tentou-se usar um transformador de corrente como ilustrado na Figura 45.

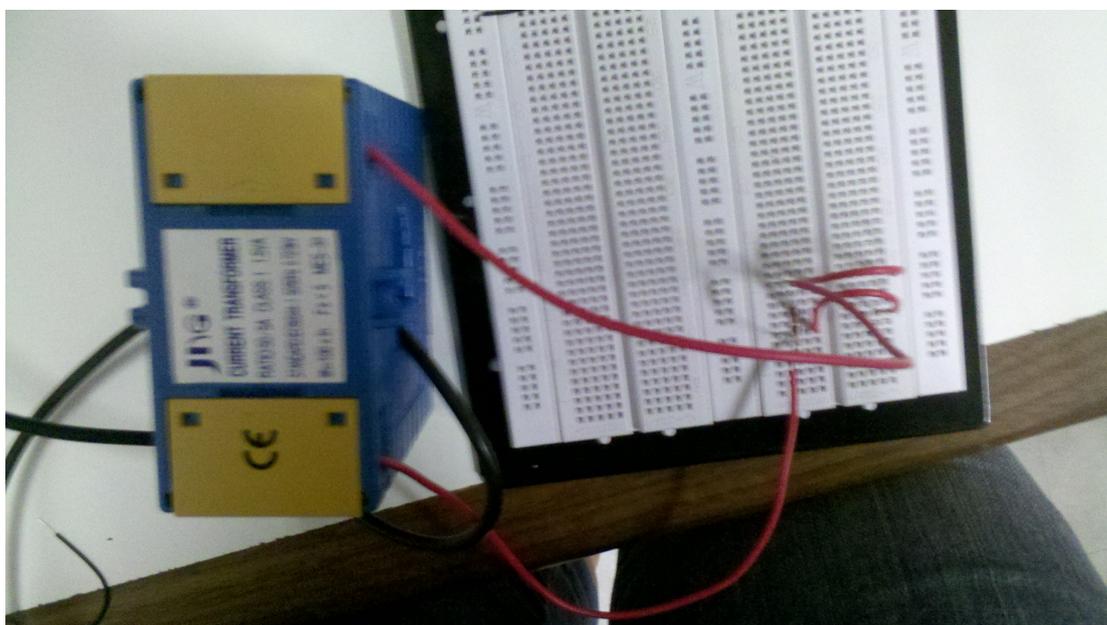


Figura 45 - Transformador para Sensoriamento de Corrente

Além da dificuldade para encontrar, custo, tamanho, e do risco de choque elétrico associados a esse equipamento, o mesmo também não funcionou da forma esperada, e por isso foi descartado do projeto.

Para realizar a medição pretendia-se usar o chip CS5463, o qual teve que ser importado. Foram feitos três pedidos em locais diferentes. Os primeiros chips pedidos demoraram três meses pra chegar ao Brasil. Enquanto isso, foram feitos mais dois pedidos: os chips pedidos na segunda remessa ainda não foram

entregues, e os últimos, pedidos em caráter de urgência, portanto com um valor de frete muito mais alto, foram entregues em alguns dias.

Devido à demora para a chegada dos chips não foi possível adaptá-los, em tempo hábil, para serem usados em uma *proto-board*, o que impossibilitou o seu uso nessa implementação.

Por fim, uma outra dificuldade foi encontrar uma forma de isolamento para o circuito. Tentou-se, para isso, usar o acoplador óptico 4N25, porém esse dispositivo apresentou uma faixa extremamente pequena de operação linear para sinais analógicos, uma vez que sua aplicação típica é para sinais digitais.

## 6. Conclusões

O presente documento abordou, de forma geral, o mercado de *Smart Grids*, fazendo uma análise das principais mudanças proporcionadas pelo uso desse tipo de rede elétrica; as formas de monitoramento do consumo de energia comparando as várias propostas de identificação do consumo de eletrodomésticos individualmente; o desenvolvimento de uma aplicação capaz de monitorar o consumo de energia e fornecer as informações necessárias para a identificação do consumo de eletrodomésticos a partir de um único ponto.

Dentre os dados medidos pela aplicação destacam-se: a potência e a energia consumidas pela carga ao longo do tempo, a tensão, corrente e fator de potência.

O desenvolvimento do protótipo permitiu um grande aprendizado no que diz respeito ao comportamento dos sinais da rede elétrica na presença dos diversos tipos de carga, além de deixar mais claras as técnicas de identificação estudadas.

Para trabalhos futuros pretende-se utilizar o CI CS4563 para efetuar a medição de energia; usar isoladores de forma a eliminar problemas com curtos circuitos causados por diferentes referências presentes no circuito; usar os dados fornecidos pelo protótipo para o desenvolvimento de uma aplicação capaz de identificar os equipamentos ligados a rede; e por fim, enviar os dados de consumo via internet, de forma a permitir o acesso remoto.

## 7. Referências

**AlertMe. 2012.** AlertMe Creating Smart Solutions. [Online] 2012. <http://www.alertme.com/>.

**ANEEL. 2002.** Energia no Brasil e no Mundo. *ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica*. [Online] 2002. [Citado em: 04 de 11 de 2012.] [http://www.aneel.gov.br/arquivos/pdf/atlas\\_par1\\_cap2.pdf](http://www.aneel.gov.br/arquivos/pdf/atlas_par1_cap2.pdf).

**Arduino. 2012.** Arduino. [Online] 2012. [www.arduino.cc](http://www.arduino.cc).

**Atmel. 2006.** AVR120: Characterization and Calibration of the . [Online] 2006. <http://www.atmel.com/Images/doc2559.pdf>.

**Balakrishnan, Meera. 2012.** Smart Energy Solutions for Home Area . [Online] 2012. <http://www.freescale.com/files/32bit/doc/brochure/PWRARBYNDBITSSSES.pdf>.

**Boccuzzi, C. e Mello, J.** A Energia do Futuro - Mercados de Atacado e Varejo se Fundindo. *XX Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica*. [Online] <http://www.smartgrid.com.br/017.pdf>.

**Bradley, Richard. 2010.** Energy Efficiency Efficiency, Electricity Electricity Demand and Smart Grids. *International Energy Agency*. [Online] 2010. <http://www.iea.org/>.

**CCI - Computer Control Instruments. 2012.** Power Mate. *Power-Mate*. [Online] 2012. <http://www.power-mate.com.au/>.

**Clements, S. L., Hadley, M. D. e Carroll, T. E. 2011.** Home Area Networks and the Smart Grid. [Online] Abril de 2011. [www.hSDL.org/?view&did=700977](http://www.hSDL.org/?view&did=700977).

**Dahle, David. 2010.** Samuel Gardiner's lamp-hour meter (1872). *Dave's old Watthour Meter webpage*. [Online] 2010. [Citado em: 06 de Julho de 2012.] <http://watthourmeters.com/others/gardiner.html>.

**Darby, S. 2006.** The effectiveness of feedback on energy consumption. *A Review for DEFRA of the Literature on Metering, Billing and direct Displays*. 2006.

**DOE: Departamento of Energy.** Smart Grid. [Online]  
<http://www.oe.energy.gov>.

**Federal Energy Regulatory Commission. 2008.** Demand Response & Advanced Metering. [Online] Dezembro de 2008.  
<http://www.ferc.gov/legal/staff-reports/12-08-demand-response.pdf>.

**Ferreira, Maria Carolina Avelar Fadul. 2010.** *Perspectivas e Desafios para a Implantação das Smart Grids: um estudo de caso dos EUA, Portugal e Brasil.* Rio de Janeiro : s.n., 2010.

**Froehlic, Jon, et al. 2011.** Disaggregated End-use Energy Sensing for the Smart Grid. 2011.

**Gupta, Sidhant, Reynolds, Matthew S. e Patel, Shwetak N. 2010.** ElectriSense: Single-Point Sensing Using EMI for Electrical Event Detection and Classification in Home. 2010.

**IBM Institute for Business Value. 2007.** *Plugging in the Consumer – Innovating utility business models.* 2007.

**iHouse. 2012.** Snapgrid. *iHouse - The Innovative House.* [Online] 2012.  
<http://www.ihouse.com.br/caracteristicas-do-snapgrid.php>.

**Josué, João Gil. 2010.** Projecto e Construção de um Sistema de Monitorização de Energia Eléctrica para uma Habitação. 2010.

**Kellerman, Alexandre. 2008.** Desperdício ainda é grande no Brasil. *Mercado de Energia Eléctrica.* [Online] 27 de 07 de 2008. [Citado em: 11 de 04 de 2012.] <http://mercadoee.blogspot.com.br/2008/07/desperdicio-ainda-grande-no-brasil.html>.

**King, Chris. 2011.** Smart meters: Why Brazil is different, and important. *eMeter - A Siemens Business.* [Online] Outubro de 2011.  
<http://www.emeter.com/smart-grid-watch/2011/smart-meters-why-brazil-is-different-and-important/>.

**Lee, Shih-chiang, Lin, Gu-yuan e Hsu, Jane Yung-jen. 2010.** Appliance Recognition and Unattended Appliance Detection for Energy Conversion. 2010.

**Ministério de Minas e Energia. 2001.** Plano Decenal de Expansão de Energia 2020. *Empresa de Pesquisa Energética*. [Online] 2001. [Citado em: 09 de 04 de 2012.] [http://www.epe.gov.br/PDEE/20120302\\_1.pdf](http://www.epe.gov.br/PDEE/20120302_1.pdf).

**Paula, Rafael Correa de. 2011.** *Análise do Impacto Conjunto da Geração Distribuída e Veículos Elétricos Plug-In em Sistemas Elétricos*. Curitiba : s.n., 2011.

**Ransan, Davi José. 2011.** Protótipo para Gerenciamento e Monitoramento de Consumo Energético. [CD-ROM]. Bento Gonçalves : s.n., 2011.

**Robot Plataform. 2012.** ADC in Atmel microcontrollers (using Atmega8). *Robot Plataform*. [Online] 2012. [http://www.robotplatform.com/knowledge/ADC/adc\\_tutorial\\_2.html](http://www.robotplatform.com/knowledge/ADC/adc_tutorial_2.html).

**Roth, Kurt e Brodrick, James. 2008.** Home Energy Displays. [Online] 2008. [http://www.reduceenergy.com/News/home\\_energy\\_displays.pdf](http://www.reduceenergy.com/News/home_energy_displays.pdf).

**Steplight. 2012.** Power Meter – Measure Appliance Energy Consumption and Cost. [Online] 2012. <http://steplight.com.au/education/monitor-energy/plug-in-electricity-power-meter/>.

**Torres, Gabriel e Lima, Cássio. 2006.** Como Conversores Analógico/Digital Funcionam. *Clube do Hardware*. [Online] 2006. <http://www.clubedohardware.com.br/artigos/Como-Conversores-Analogico-Digital-Funcionam/1307/9>.

**U.S. Department of Energy.** The Smart Grid: An Introduction. [Online] [http://energy.gov/sites/prod/files/oeprod/DocumentsandMedia/DOE\\_SG\\_Book\\_Single\\_Pages%281%29.pdf](http://energy.gov/sites/prod/files/oeprod/DocumentsandMedia/DOE_SG_Book_Single_Pages%281%29.pdf).

**Vieira, José Gonçalves. 2011.** Conheça o primeiro trabalho sobre Smart Grid desenvolvido por pesquisadores no Brasil. *Smartgrid News*. [Online] 2011. [Citado em: 06 de Julho de 2012.] <http://smartgridnews.com.br/conheca-com-exclusividade-o-primeiro-trabalho-sobre-smart-grid-desenvolvido-por-pesquisadores-brasileiros/>.

**Watts Up Meters. 2012.** Watts Up? [Online] 2012.  
<https://www.wattsupmeters.com/secure/products.php?pn=0&wai=297&more=4>.

**Weems Creek Solutions. 2012.** Kill A Watt Power Monitor. *Weems Creek Solutions - Energy Savings and Emergency Preparedness*. [Online] 2012.  
<http://www.weemscreeksolutions.com/KillAWatt.htm>.

—. 2012. P4480 Kill A Watt. *Weems Creek Solutions - Energy Savings and Emergency Preparedness*. [Online] 2012.  
[http://www.weemscreeksolutions.com/kaw\\_graphic\\_timer.htm](http://www.weemscreeksolutions.com/kaw_graphic_timer.htm).

**Wikipedia. 2012.** Gerador elétrico. *Wikipedia - A enciclopedia livre*. [Online] 05 de Julho de 2012. [Citado em: 06 de Julho de 2012.]  
[http://pt.wikipedia.org/wiki/Gerador\\_el%C3%A9trico](http://pt.wikipedia.org/wiki/Gerador_el%C3%A9trico).

—. 2012. Implementation examples. *Smart Meters*. [Online] Julho de 2012. [http://en.wikipedia.org/wiki/Smart\\_meter#Implementation\\_examples](http://en.wikipedia.org/wiki/Smart_meter#Implementation_examples).

—. 2012. Turbina hidráulica. *Wikipedia - A enciclopédia Livre*. [Online] 24 de Abril de 2012. [Citado em: 6 de Julho de 2012.]  
[http://pt.wikipedia.org/wiki/Turbina\\_hidr%C3%A1ulica](http://pt.wikipedia.org/wiki/Turbina_hidr%C3%A1ulica).