

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE INFORMÁTICA
CURSO DE ENGENHARIA DA COMPUTAÇÃO

VICTOR VINICIUS MENDOZA GUIMARÃES

**Desenvolvimento de um módulo de
monitoramento de consumo de energia para
a construção de Smart Appliances utilizando
o Sun SPOT**

Trabalho de Conclusão apresentado como
requisito parcial para a obtenção do grau
de Bacharel em Engenharia da Computação

Prof. Dr. Carlos Eduardo Pereira
Orientador

Mestrando Lucas Bortolaso Torri
Co-orientador

Porto Alegre, dezembro de 2011.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Reitor: Prof. Carlos Alexandre Netto

Vice-Reitor: Prof. Rui Vicente Oppermann

Pró-Reitora de Graduação: Profa. Valquiria Linck Bassani

Diretor do Instituto de Informática: Prof. Luís da Cunha Lamb

Coordenador do Curso de Engenharia de Computação: Prof. Sérgio Luís Cechin

Bibliotecária-Chefe do Instituto de Informática: Beatriz Regina Bastos Haro

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	5
LISTA DE TABELAS	6
RESUMO	7
ABSTRACT.....	8
1 INTRODUÇÃO.....	9
1.1 Objetivo.....	9
1.2 Organização do Texto.....	9
2 CONTEXTUALIZAÇÃO	11
2.1 Smart Grid.....	11
2.2 Advanced Metering Infrastructure – AMI.....	12
2.3 Smart Appliances	14
3 AMBIENTE DE DESENVOLVIMENTO.....	15
3.1 Sun SPOT	15
3.1.1 Conversor Analógico/Digital ADT7411	17
3.1.2 Temporizador / Contador AT91	18
3.2 O micro medidor Kill-a-Watt	19
3.3 Esquemático de Ligação	21
4 DESENVOLVIMENTO	23
4.1 Como obter a energia consumida	23
4.2 Apresentação do Algoritmo	25

	4
4.2.1 Obtendo a informação da potência e energia consumida.	25
4.2.2 Obtendo a informação do tempo decorrido.	28
4.2.3 Fluxograma completo do algoritmo.	28
4.3 Configurando o Conversor Analógico-Digital	29
4.3.1 Registrador de controle de configuração 1 (endereço 18h).....	30
4.3.2 Registrador de controle de configuração 2 (endereço 19h).....	30
4.3.3 Registrador de controle de configuração 3 (endereço 1Ah).....	31
4.4 Configurando os Contadores	32
4.5 Adquirindo Amostras	32
5 APRESENTAÇÃO E VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS.....	36
5.1 Etapas para validação	36
5.2 Metodologia da validação.....	36
5.2.1 Validação de valores de Tensão e Corrente.....	36
5.2.2 Validação de potência e energia consumida.....	37
5.2.3 Validação de integração.....	37
5.3 Resultados Obtidos	38
5.3.1 Equipamento desligado	39
5.3.2 Lâmpada incandescente	42
5.3.3 Lâmpada fluorescente.....	46
5.3.4 Integração com plataforma de micro-medição	48
6 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS	50
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	51

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Visão de [EUROPEAN TECHNOLOGY PLATFORM] de como será a rede no futuro.	12
Figura 2.2 Modelo de uma AMI segundo [ILLINOIS SECURITY LAB].	13
Figura 2.3. GE - Nucleous Energy Manager.	14
Figura 3.1. Sun SPOT.....	16
Figura 3.2. Diagrama de software do Sun SPOT.	16
Figura 3.3. O micro-medidor Kill a Watt.	20
Figura 3.4. Diagrama de pinos do LM2902.	20
Figura 3.5. Diagrama de blocos do projeto.	21
Figura 3.6. Circuito do bloco de ajuste.....	22
Figura 4.1. Solução para calculo da potência.	25
Figura 4.2. Fluxograma do procedimento.	27
Figura 4.3. Fluxograma completo do algoritmo.	29
Figura 4.4. Trecho de código Java para configurar registrador de configuração 1.	30
Figura 4.5. Trecho de código Java para configurar registrador de configuração 2.	31
Figura 4.6. Trecho de código Java para configurar registrador de configuração 3.	31
Figura 4.7. Trecho de código Java para configurar os contadores.	32
Figura 4.8. Trecho de código para aquisição de amostra de tensão.	34
Figura 4.9. Trecho de código para aquisição de amostra de corrente.	35
Figura 5.1. Gráfico do intervalo de amostragem pelo instante em que a amostra ocorreu.	38
Figura 5.2. Sinal de tensão de entrada do Sun SPOT.	39
Figura 5.3. Sinal de corrente de entrada do Sun SPOT com equipamento desligado. ...	40
Figura 5.4. Ruído no sinal de corrente de entrada.	41
Figura 5.5. Sinal recuperado de tensão.	41
Figura 5.6. Sinal recuperado de corrente referente a equipamento desligado.	42
Figura 5.7. Sinal de corrente para lâmpada incandescente.	43
Figura 5.8. Sinal de corrente para lâmpada incandescente capturado com acoplamento AC.....	43
Figura 5.9. Sinal recuperado de tensão referente à luz incandescente.	44
Figura 5.10. Sinal recuperado de corrente referente à luz incandescente.....	45
Figura 5.11. Sinal de corrente para lâmpada fluorescente.....	46
Figura 5.12. Sinal de corrente para lâmpada fluorescente capturado com acoplamento AC.....	47
Figura 5.13.Sinal recuperado de tensão referente à luz fluorescente.	47
Figura 5.14. Sinal recuperado de corrente referente à luz fluorescente.	48
Figura 5.15. Valores obtidos após a integração dos módulos[TORRI].....	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1. Tempo Típico de conversão para cada configuração e canal do ADT7411 em modo Single-Channel. [ADT7411-DATASHEET].....	18
Tabela 3.2. Tempo típico de conversão para realização de um ciclo de amostras em modo Round-Robin. [ADT7411-DATASHEET]	18
Tabela 3.3. Velocidades de clock disponíveis para os temporizadores/contadores [GOLDMAN].	19
Tabela 4.1. Registrador de configuração 1 [ADT7411-DATASHEET].	30
Tabela 4.2. Registrador de configuração 2 [ADT7411-DATASHEET].	31
Tabela 5.1. Comparação dos valores entre Sun SPOT e Kill-a-Watt para a lâmpada incandescente.....	45
Tabela 5.2. Comparação dos valores entre SunSPOT e Kill-a-Watt para a lâmpada fluorescente.....	48

RESUMO

Este trabalho visa desenvolver um módulo de monitoramento do consumo de energia em aparelhos eletro-eletrônicos, de forma que também possa prover informações sobre tensão, corrente e potência de um equipamento a fim de permitir o seu uso em plataformas que possibilitem a construção de Smart Appliances. Com a utilização de um micro-medidor, os sinais de tensão e corrente de um aparelho são recuperados. Esses dados passam um processo de amostragem e são digitalizados. É calculada a potência do equipamento e então se realiza a estimativa da energia consumida. Realizou-se uma validação dos dados obtidos pelo módulo e estes se mostraram bastantes satisfatórios.

Palavras-Chave: monitoramento do consumo de energia, smart appliances, smart grid, micro-medidor, Sun spot.

ABSTRACT

This paper aims to develop a module for monitoring energy consumption in electronic devices, also providing information about voltage, current and power of a device to allow its use on platforms that allow the construction of smart appliances. With the use of a micro-meter, voltage and current signals of the device is retrieved. These data are sampled and then the power of the device is calculated and the energy consumption is estimated. A validation process was performed and the data obtained by the module was quite satisfactory.

Keywords: Monitoring of energy consumption, smart appliances, smart grid, micro-meter, Sun SPOT.

1 INTRODUÇÃO

Com os problemas enfrentados mundialmente para a geração e fornecimento de energia elétrica e a crescente preocupação com uso eficiente desta, muitos países vêm concentrando esforços para projetar um novo sistema de distribuição de energia que seja mais eficiente e integrado – o Smart Grid. Uma das propostas desse sistema é de que a energia deixaria de ser gerada somente por grandes estações centralizadas e o consumidor final teria a possibilidade de se tornar um membro ativo tanto no processo de produção desta quanto na escolha de suas fontes de abastecimento.

Esse sistema prevê o uso de *Smart Appliances* que são eletrodomésticos capazes de monitorar o seu consumo de energia e trocar informações entre si ou com aparelhos centralizadores de dados.

1.1 Objetivo

O objetivo deste trabalho é desenvolver um módulo que possa monitorar o consumo de energia de um aparelho eletro-eletrônico e que possa prover de uma forma fácil, informações como tensão da rede, corrente do aparelho e potência do equipamento. Permitindo assim que o módulo desenvolvido seja integrado de forma simples a um sistema capaz de elevar o grau de um eletrodoméstico a um Smart Appliance.

O projeto desenvolvido será utilizado como um módulo para fornecer informações de tensão, corrente, potência e energia de um aparelho qualquer no trabalho de mestrado em ciências da computação de Lucas Bortolaso Torri, o qual apresenta uma plataforma extensível para micro medição em Smart Appliances.

1.2 Organização do Texto

O trabalho será apresentado na seguinte ordem:

- Capítulo 2: Contextualização – aborda os conceitos de Smart Grid, AMI e Smart Appliance.
- Capítulo 3: Ambiente de desenvolvimento – apresenta a solução para se alcançar o objetivo e os equipamentos utilizados para isso.
- Capítulo 4: Desenvolvimento – apresenta como a solução foi desenvolvida.
- Capítulo 5: Apresentação e validação dos resultados – apresenta as etapas necessárias para validar a solução desenvolvida; como foi realizada cada etapa e os resultados obtidos em cada uma.

- Capítulo 6: Conclusão e trabalhos futuros: apresenta um resumo das etapas do trabalho desenvolvido, as considerações finais e sugestão para um trabalho futuro.

2 CONTEXTUALIZAÇÃO

Esse capítulo irá apresentar os conceitos de Smart Grid, AMI e Smart Appliance.

2.1 Smart Grid

Conforme [LITOS] o setor elétrico está se preparando para migrar de uma rede centralizada – controlada pelo produtor – para uma que é menos centralizada e mais interativa com o consumidor. Essa mudança para uma rede mais inteligente promete mudar todo o modelo de negócios da indústria e sua relação com os consumidores, envolvendo e afetando serviços públicos, órgãos reguladores, prestadores de serviços de energia, fornecedores de tecnologia e informação e os demais consumidores de energia elétrica.

Segundo a [EUROPEAN TECHNOLOGY PLATFORM], no futuro, uma parte da energia gerada por grandes centrais convencionais dará lugar à geração distribuída através de fontes renováveis, possibilitando respostas eficientes de requisições de energia e um controle da demanda e do armazenamento de energia de forma inteligente. Como ilustra a Figura 2.1, a operação desse sistema será compartilhada entre os geradores centrais e os distribuídos, estes podendo ser agregados para formar micro-redes ou redes virtuais, facilitando assim a integração tanto dos sistemas físicos quanto no que diz respeito ao mercado.

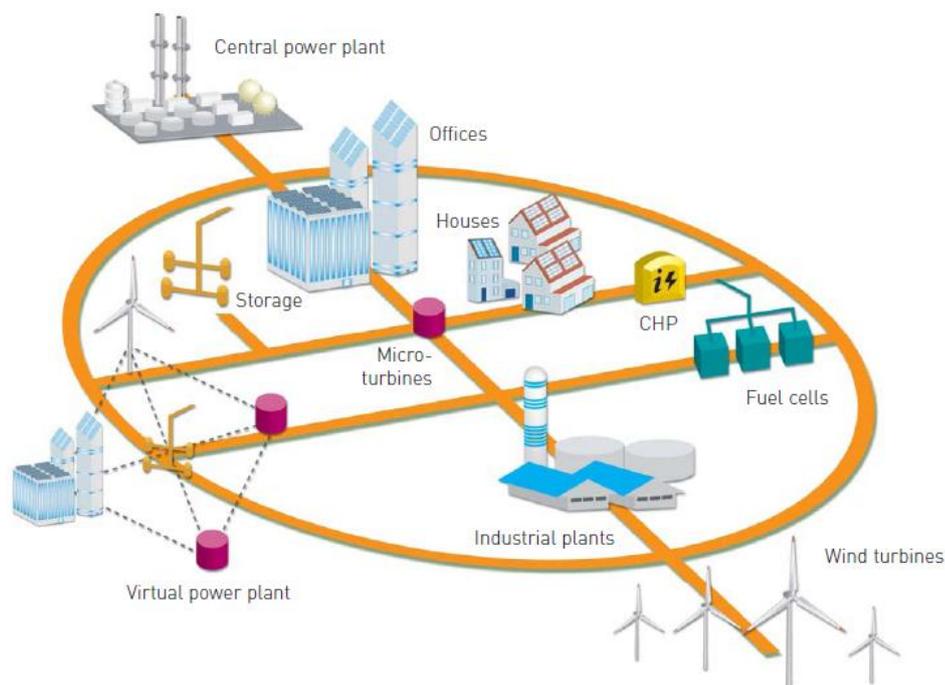


Figura 2.1 Visão de [EUROPEAN TECHNOLOGY PLATFORM] de como será a rede no futuro.

Para que o desenvolvimento da Smart Grid seja possível, deve-se ter um conjunto de tecnologias que permitam toda a interação prevista. Devem-se conhecer alguns fatores, entre eles, o quanto de energia uma residência está consumindo, onde obtê-la e qual o preço dela em determinado horário. Baseado nessas necessidades incorporou-se ao Smart Grid uma infra-estrutura responsável por uma medição avançada e pela troca de informações com centrais: o AMI.

2.2 Advanced Metering Infrastructure – AMI

O AMI – Advanced Metering Infrastructure – trata-se de uma infra-estrutura composta de sistemas responsáveis pela medição, pela coleta e pela análise do uso de energia. Tais sistemas possuem a capacidade de interagir com dispositivos avançados como medidores de gás, eletricidade e calor através de diversos canais de comunicação, seja sob demanda ou em períodos pré-definidos. Dessa forma, essa infra-estrutura é composta tanto por componentes de hardware como de software, permitindo uma comunicação bidirecional com fornecedores de energia, sistemas comerciais e até mesmo outros consumidores. Essas características provenientes do AMI vêm de encontro direto aos objetivos do Smart Grid, uma vez que elas permitem que ações possam ser tomadas em resposta a, por exemplo, variações do preço de energia ou estímulos externos para a redução de gastos em horários de pico. E conforme [NYSEG e RGE], muitas empresas consideram que a implementação de um sistema AMI é um passo fundamental para o desenvolvimento de uma Smart Grid.

Segundo [SYNAPSE] o AMI é composto basicamente por três componentes:

- Um “Smart Meter” – medidor elétrico que retém as informações de consumo em intervalos de uma hora ou menos e envia essa informação para a companhia para fins de acompanhamento e cobranças.
- Uma rede de comunicação entre o Smart Meter e a companhia – encarregada de enviar sinais de preços e controle para o medidor e recolher informações como: se a casa está recebendo energia, se certos aparelhos estão ligados ou desligados e o consumo da residência. Isso estabelece uma comunicação bidirecional.
- E uma aplicação de gerenciamento dos dados (MDMA – Meter Data Management Application) que fica na companhia, sendo capaz de processar os dados coletados pelo medidor inteligente.

A Figura 2.2 ilustra um modelo de AMI, onde, do lado do usuário, existem vários aparelhos inteligentes interligados a uma central responsável por se comunicar com o Smart Meter; uma camada para transportar os sinais enviados do medidor à companhia e vice-versa, estabelecendo uma comunicação bidirecional; e a parte de gerenciamento dos dados, na concessionária de energia.

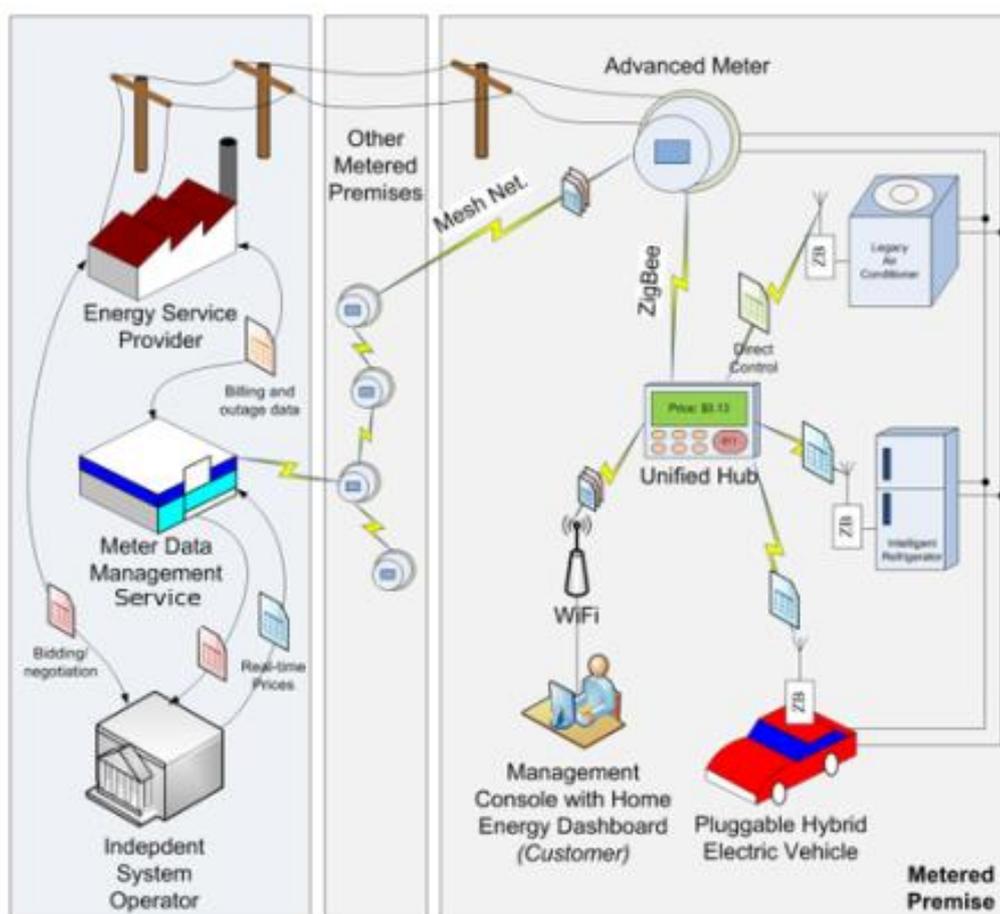


Figura 2.2 Modelo de uma AMI segundo [ILLINOIS SECURITY LAB].

Embora uma das funções do medidor inteligente seja a de enviar sinais de preço para os equipamentos internos da casa, é importante salientar que o AMI não inclui nenhum controle destes aparelhos. Para que eles possam se comunicar entre si ou com o medidor inteligente é necessário que consigam medir o seu próprio consumo e que tenham algum

método de comunicação com uma central da casa. A estes dispositivos com certo grau de inteligência dá-se o nome de Smart Appliances.

2.3 Smart Appliances

A tradução de Smart Appliance para o português é utensílio inteligente. De acordo com [AHAM], este termo, em relação ao Smart Grid, se refere a uma modernização do sistema de uso da eletricidade por um aparelho doméstico de forma que ele possa monitorar, proteger e ajustar automaticamente o seu funcionamento de acordo com as necessidades do proprietário da casa. As seguintes características podem fazer parte dessa gama de eletrodomésticos:

- Capacidade de ajustar a demanda do consumo de energia elétrica ao receber informações de preços da eletricidade.
- Possibilidade de resposta a sinais da concessionária contribuindo para melhorar a capacidade da gestão de pico da Smart Grid e economizar energia através do:
 - Fornecimento de lembretes aos consumidores para incentivar o uso de energia quando os preços são mais baixos.
 - Barramento ou diminuição automática do uso com base em diretrizes pré-definidas pelo usuário.
- Ajuste automático para responder a situações de emergência, podendo se antecipar e ajudar a prevenir apagões ou blecautes.
- Desenvolvimento do próprio perfil de consumo e uso dos dados pelo usuário, uma vez que esses eletrodomésticos podem estar conectados a uma rede doméstica e/ou serem controlados por um sistema de gestão de energia, permitindo o acesso ao total de energia consumida pela casa.

A Figura 2.3 ilustra a solução da GE (General Electric Company) para monitorar e gerenciar o consumo de energia elétrica em uma residência.

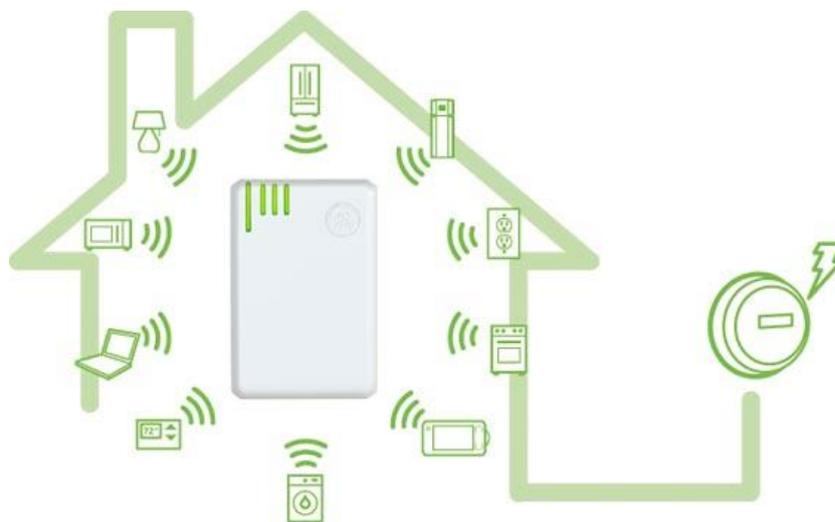


Figura 2.3. GE - Nucleous Energy Manager.

3 AMBIENTE DE DESENVOLVIMENTO

Esse capítulo apresentará os equipamentos utilizados para o desenvolvimento do trabalho e suas características.

Basicamente, para que um eletrodoméstico possa ser considerado e utilizado como um Smart Appliance, há a necessidade de uso de dois componentes principais, são eles: um micro medidor de energia (para capturar informações como corrente, tensão, potência e energia consumida) e um sistema de controle, o qual tem a função de comunicar o aparelho com uma central e permitir o acompanhamento e/ou controle do seu consumo.

Este trabalho utilizará o aparelho de micro-medição Kill-a-Watt, fabricado pela *P3 International* para prover os sinais de tensão da rede elétrica e sinais de corrente de um aparelho, os quais serão usados para calcular a potência do equipamento e fazer uma estimativa do seu consumo de energia. A seção 3.2 apresentará as características do Kill-a-Watt.

Para capturar o sinal de tensão e corrente providos pelo Kill-a-Watt e realizar os cálculos de potência e energia consumida por um aparelho, será o utilizado o Sun SPOT que é uma plataforma de hardware desenvolvida e comercializada pela Sun Microsystems. Essa plataforma possui características que vêm de encontro com um dos objetivos do trabalho, o qual é de fornecer de forma fácil informações sobre os valores de medidos de um aparelho. Além disso, o Sun SPOT também foi utilizado no trabalho do Lucas B. Torri, possibilitando assim, que o módulo desenvolvido tenha uma simples integração na plataforma proposta pelo mestrando.

3.1 Sun SPOT

O Sun SPOT (*Small Programmable Object Technology*) é uma plataforma de hardware desenvolvida e comercializada pela Sun microsystems, a qual roda a máquina virtual Java Squawk, permitindo assim o desenvolvimento de aplicações em Java que combinada com bibliotecas próprias da plataforma permite um fácil acesso aos recursos de hardware que ela disponibiliza. A figura 3.1 apresenta essa plataforma de hardware.



Figura 3.1. Sun SPOT.

Esta plataforma de hardware possui a capacidade de expansão ao se acrescentar novos módulos. Para facilitar o desenvolvimento, o Sun SPOT é distribuído junto com a placa de expansão *eDemo Board* que possui alguns itens como um acelerômetro, LEDs, switches, temporizadores, entradas e saídas digitais e entradas analógicas – as quais utilizam o conversor analógico/digital da *Analog Devices ADT7411*.

A figura 3.2, apresentada no [SPOT-DEVELOPER'S GUIDE] mostra a arquitetura do sistema utilizado nessa plataforma.

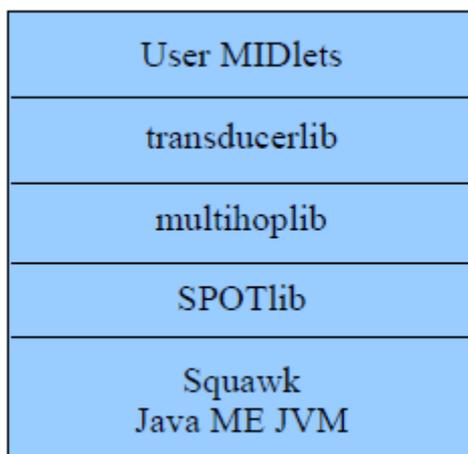


Figura 3.2. Diagrama de software do Sun SPOT.

No topo, é onde fica a aplicação desenvolvida por um usuário, a qual estende a classe Java ME MIDlet. No nível mais inferior do diagrama encontra-se a máquina virtual Java Squawk, sendo que não existe um sistema operacional. Entre esses níveis, encontram-se várias bibliotecas do SPOT. O acesso ao dispositivo do SPOT e às

entradas e saídas básicas são possibilitadas pela *SPOTlib*. A *multihopl* fornece protocolos para a utilização da comunicação de rádio do Sun SPOT. Já a *transducerlib* fornece acesso ao hardware da *eDemo board*.

3.1.1 Conversor Analógico/Digital ADT7411

O ADT7411 é um conversor analógico-digital que possui as seguintes funcionalidades:

- Sensor de temperatura (interno e externo) de resolução de 10 bits – equivalente a 0,25°C;
- Oito canais de conversão analógica / digital com 10 bits de resolução;
- Comunicação SPI e I²C;

Ao ser iniciado, o ADT7411 entra em modo de calibração, onde realiza a medição da tensão de alimentação e a usa para calibrar qualquer erro de aquisição da temperatura devido à diferença de tensões de alimentação. Após esse processo, o conversor entra em um estado de espera onde não realiza nenhuma amostra.

Existem dois tipos de modos de medição, o *Round-Robin* e o *Single-Channel*. O primeiro consiste em realizar amostras seqüenciais passando por cada canal disponível na seguinte ordem:

- Canal de tensão de alimentação;
- Canal de sensor de temperatura interno;
- Canal de sensor de temperatura externo ou pinos de entrada analógica AIN1 e AIN2;
- Canal de entrada analógica AIN3;
- Canal de entrada analógica AIN4;
- Canal de entrada analógica AIN5;
- Canal de entrada analógica AIN6;
- Canal de entrada analógica AIN7;
- Canal de entrada analógica AIN8;

Ao realizar a amostra do canal AIN8, o dispositivo volta ao laço para um novo ciclo de medição. Já no modo de operação *Single-Channel*, escolhe-se um único canal para realizar amostras, as quais são efetuadas repetidamente. Nesse modo, qualquer comunicação ao ADT7411 interrompe a conversão, a qual será reinicializada após a operação de leitura ou escrita ser finalizada.

Além da escolha do modo de amostragem, é possível configurar mais duas funcionalidades do conversor: média de amostras (ativa ou inativa) e velocidade de conversão (rápida ou lenta).

A média de amostras força o dispositivo a realizar uma média de 16 leituras para só assim prover o valor final da conversão, fato que faz com que os ruídos sejam reduzidos.

O circuito de oscilador interno usado para realizar as conversões AD possui a capacidade para selecionar duas frequências de clock diferentes (1.4Hz e 22KHz), significando que o dispositivo é capaz de ter duas velocidades distintas quando realiza uma amostra. Sendo assim, o tempo para realizar uma conversão pode ser reduzido selecionando a frequência de maior valor, a qual desabilita os filtros analógicos do dispositivo. A Tabela 3.1 apresenta o tempo típico de conversão para cada configuração e canal do dispositivo em modo Single-Channel e a Tabela 3.2 o tempo típico para completar um ciclo de amostras passando por todos os canais em modo Round-Robin.

Tabela 3.1. Tempo Típico de conversão para cada configuração e canal do ADT7411 em modo Single-Channel. [ADT7411-DATASHEET].

	Vdd/AIN	Temperatura Interna	Temperatura Externa
Velocidade Lenta Média de Amostras Habilitado	11.4 ms	11.4 ms	24.22 ms
Velocidade Lenta Média de Amostras Desabilitada	712 μ s	712 μ s	1.51 ms
Velocidade Rápida Média de Amostras Habilitado	712 μ s	2.14 ms	14.25 ms
Velocidade Rápida Média de Amostras Desabilitada	44.5 μ s	134 μ s	890 μ s

Tabela 3.2. Tempo típico de conversão para realização de um ciclo de amostras em modo Round-Robin. [ADT7411-DATASHEET]

	Velocidade Lenta	Velocidade Rápida
Média de Amostras Habilitado	125.4 ms	9.26 ms
Média de Amostras Desabilitada	17.1 ms	578.96 μ s

3.1.2 Temporizador / Contador AT91

O Sun SPOT possui dois AT91 que são temporizadores/contadores que podem ser utilizados em uma variedade de maneiras. Segundo [GOLDMAN] cada AT91 possui três canais de temporizadores/contadores de 16 bits. Desses seis canais, quatro estão disponíveis para uso em aplicações enquanto que os outros dois são reservados para uso do sistema. Esse temporizador pode operar em dois modos distintos, o modo de captura e o modo gerador de sinais. Cada canal é independente e pode ser utilizado para uma

série de funções, dentre elas estão a medição de frequência, contador de eventos, medição de intervalos, geração de pulsos, atraso de tempo e modulação por largura de pulso (PWM).

Cada canal possui três entradas externas de clock, cinco entradas internas de clock e dois sinais de entrada ou saída que podem ser configurados pelo usuário. Ainda existe a possibilidade de cada canal gerar interrupções.

Os canais são organizados em contadores de 16 bits, que têm seu valor incrementado a cada borda positiva do clock selecionado. Quando o contador chega ao valor de FFFFh e passa para o valor 0, o bit de overflow do registrador de status do contador é ativado, podendo ser gerada uma interrupção.

A taxa com que cada contador/temporizador têm seu valor incrementado depende da frequência de clock utilizada. Existem cinco clocks que podem ser escolhidos, eles são conectados ao *Master Clock* (MCK) do sistema, ao clock lento (SLCK) e às divisões deles. Para a versão de hardware do Sun SPOT utilizado no projeto, a velocidade para o MCK vale 59,904 KHz e para o SLCK é de 32,768 KHz.

A Tabela 3.3 apresenta as velocidades de clock que podem ser escolhidas para a versão do Sun SPOT utilizado.

Tabela 3.3. Velocidades de clock disponíveis para os temporizadores/contadores [GOLDMAN].

Definição do clock	Clock	Velocidade do clock (KHz)	Tempo para um incremento (μ s)	Máxima duração (ms)
TC_CLKS_MCK2	MCK / 2	29.952	0,0334	2,188
TC_CLKS_MCK8	MCK / 8	7.488	0,1335	8,752
TC_CLKS_MCK32	MCK / 32	1.872	0,5342	35,009
TC_CLKS_MCK128	MCK / 128	468	2,1368	140,034
TC_CLKS_SLCK	SLCK	32,768	30,5176	2.000,0

3.2 O micro medidor Kill-a-Watt

O Kill-a-Watt é um aparelho de micro-medição fabricado pela *P3 International* e irá fornecer as informações referentes ao sinal de tensão e corrente necessários para a obtenção da energia consumida. A Figura 3.3 mostra uma imagem deste aparelho.



Figura 3.3. O micro-medidor Kill a Watt.

O micro medidor Kill a Watt possui, entre outros, o componente integrado LM2902. De acordo com [LM2902-DATASHEET], este circuito integrado é composto por quatro amplificadores operacionais que foram projetados especificamente para trabalhar em single-supply (única alimentação). Neste modo, é possível obter valores de saída que vão de GND até $V_{cc} - 1.5V$. A Figura 3.4 apresenta o diagrama de pinos para esse componente.

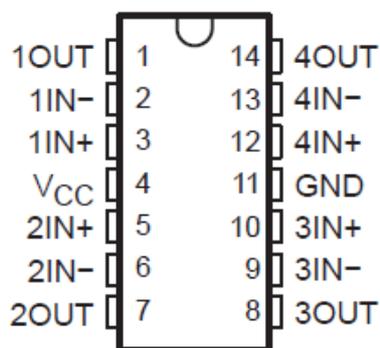


Figura 3.4. Diagrama de pinos do LM2902.

Para mensurar a energia consumida pelo aparelho acoplado ao medidor, o sinal de tensão e corrente deste aparelho passar por um condicionamento dentro do Kill-a-Watt, e segundo [KILL-A-WATT-STEP11], esses sinais, já pré-processados, podem ser obtidos monitorando os pinos 1 e 14 do componente integrado LM2902. O pino 1 (1OUT) refere-se ao sinal da corrente, enquanto que o pino 14 (4OUT) refere-se ao sinal da tensão.

Segundo [KILL-A-WATT], o Kill-a-Watt apresenta as seguintes características elétricas:

- Máxima tensão: 125 VAC.
- Máxima corrente: 15 A.
- Máxima potência medida: 1800 Watts.

3.3 Esquemático de Ligação

A Figura 3.5 apresenta o diagrama de blocos do projeto. Ela mostra um dispositivo ligado na rede elétrica e conectado ao Kill-a-Watt. Este captura a tensão e corrente do equipamento, as quais passam por um bloco de ajuste, que é responsável por normalizar os sinais capturados através do micro-medidor de forma que estes não ultrapassem os maiores valores aceitos pelos pinos de entrada analógica do Sun SPOT. Os sinais analógicos são então convertidos para digital e, com isso, é feito o cálculo da potência e energia do equipamento. O bloco referente a troca de informação simboliza a interface para acessar os dados obtidos pelo Sun SPOT.

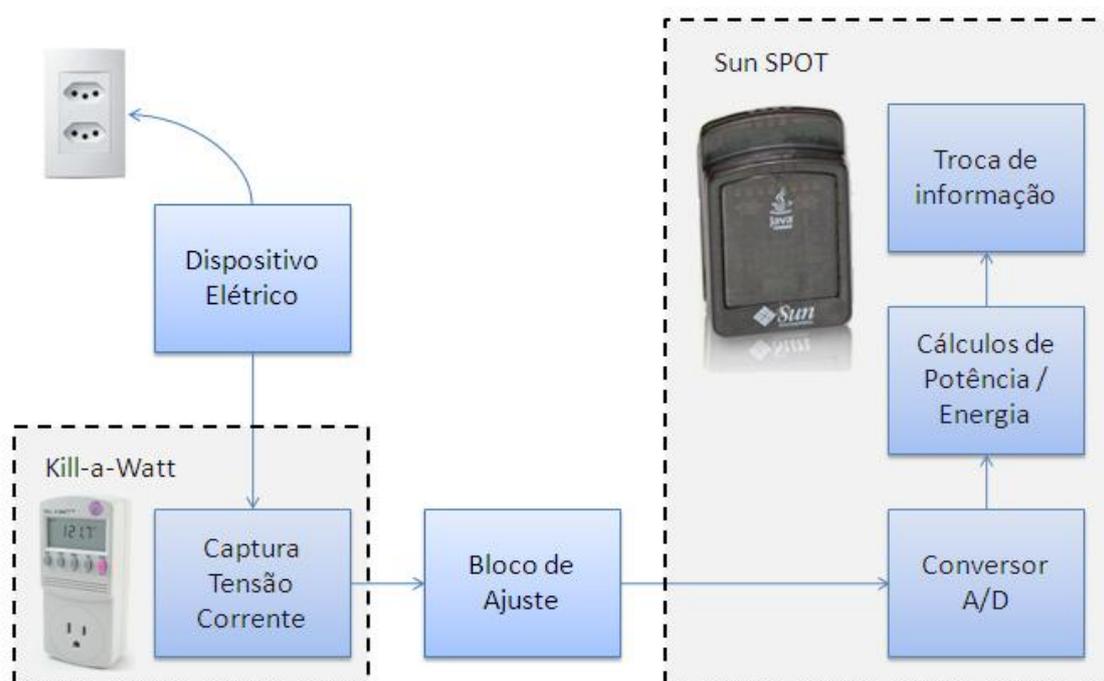


Figura 3.5. Diagrama de blocos do projeto.

Foi verificado que o Kill-a-Watt possui uma alimentação para seu circuito de 6 volts. Como visto na seção 3.2, os sinais de corrente e tensão que esse equipamento gera podem excursionar de 0 a $(V_{cc} - 1.5V)$, sendo assim, o maior valor que esses sinais podem assumir é de 4,5 volts. Segundo [SUN MICROSYSTEMS], o maior valor que o Sun SPOT suporta nos seus pinos de entrada analógica é de 3 volts, portanto é necessário que os sinais adquiridos pelo micro-medidor passem por um bloco de ajuste antes de serem ligados ao Sun SPOT. Esse bloco é o circuito divisor de tensão apresentado na Figura 3.6

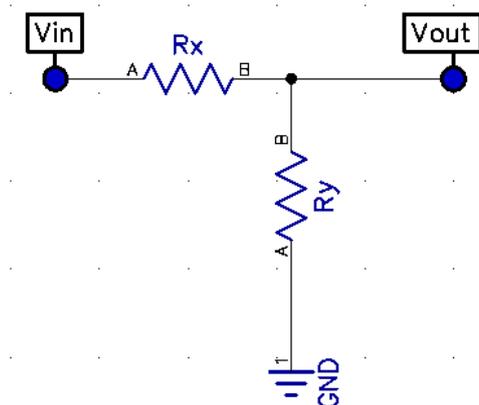


Figura 3.6. Circuito do bloco de ajuste.

A equação de saída desse bloco é dada por:

Assim, para se obter uma tensão de saída igual a 3 volts quando a tensão de entrada tem o valor de 4,5 volts, deve-se ter a seguinte relação entre as resistências:

//

Quando a saída do bloco marcar o maior valor possível (3 volts), ele irá representar a máxima tensão permitida pelo Kill-a-Watt para um sinal de tensão ou a máxima corrente permitida para um sinal de corrente.

4 DESENVOLVIMENTO

Esse capítulo abordará os seguintes tópicos do projeto:

- Como obter a energia consumida.
- Apresentação do Algoritmo.
- Configurando o conversor analógico digital
- Configurando os contadores.
- Adquirindo as amostras.

4.1 Como obter a energia consumida

Sabe-se que a energia consumida por um aparelho é dada pela integral da potência do dispositivo em relação ao tempo. Se a potência do dispositivo é constante durante o tempo, o cálculo da energia se resume a multiplicação da potência pelo período em que esta esteve presente. Caso a potência não seja constante, é possível aproximar o valor da integração multiplicando o valor médio da potência pelo período em que esta esteve presente.

Portanto, para que seja possível estimar o valor da energia consumida, deve-se saber qual é o valor da potência do aparelho e o tempo em que ela esteve presente. É sabido que a potência elétrica de um aparelho é dada pela multiplicação da sua tensão pela corrente. Assim, para se obter a potência, deve-se obter a tensão e a corrente do aparelho.

No Brasil, a rede elétrica é distribuída na frequência de 60Hz, assim, temos uma onda de tensão elétrica em forma senoidal a cada 16.67 milésimos de segundo, aproximadamente. Com isso, para calcular a energia consumida por um aparelho em um ciclo dessa onda senoidal, pode-se realizar amostras de tensão e corrente, multiplicar cada valor amostrado de tensão pelo respectivo valor amostrado de corrente, dividir pelo número de amostras do período – obtendo a potência média – e então multiplicar pela duração desse período (16.67 ms).

Neste projeto, os valores de tensão e corrente de um aparelho são fornecidos pelo micro medidor Kill a Watt e, para recuperar esses valores, é utilizado o conversor analógico-digital do Sun SPOT apresentado na seção 3.1.1. Como visto nessa seção, o ADT7411 pode operar no modo Single-Channel – amostrando apenas um canal por vez – ou no modo Round-Robin – realizando amostras em todos canais, um seguido do

outro. Para se obter a potência instantânea do aparelho em que se está realizando a medição, é preciso ter a informação sobre a tensão e a corrente no mesmo instante. Infelizmente, o conversor analógico-digital utilizado não consegue realizar amostras em dois canais simultaneamente. Para realizar amostras em dois canais diferentes há duas soluções, cada uma com um modo de operação diferente:

- Se estiver em Single-Channel: deve-se realizar amostra do canal onde se encontra a informação da tensão; trocar o canal de amostragem selecionando o canal onde se encontra a informação de corrente; realizar a amostra da corrente; e, por fim, calcular a potência naquele instante. Ao realizar esse procedimento, o tempo para se trocar de canal e realizar as amostras já faz com que haja uma diferença significativa dos instantes em que os dados foram amostrados, e, por consequência, o cálculo da potência instantânea passa a não ser válido.
- Se estiver em Round-Robin: embora este modo não realize a amostra de dois canais simultaneamente, ele automaticamente troca o canal a ser amostrado, e, se uma amostra é realizada em um tempo muito pequeno, pode-se considerar que os valores de canais consecutivos pertencem ao mesmo instante. Assim, esse modo é o que mais se aproxima à situação desejada. Por outro lado, como mostra Tabela 3.2 o menor tempo para terminar um ciclo de amostragens nesse modo é de 578.96 micro segundos (muito maior que o menor tempo do outro modo), fato que limitaria a escolha do número de amostras a se realizar dentro de um ciclo de onda.

Levando em consideração o tempo que o conversor analógico-digital utilizado leva para realizar uma amostra; que a duração do ciclo de onda em questão é de 16.67 milésimos de segundo; que quanto mais amostras se realizar, mais fiel será o valor da potência estimada, decidiu-se realizar 30 amostras dentro de um ciclo. Baseado nisso, cada amostra deve ser realizada a cada 555 micro segundos (—————). Essa escolha não permite que o ADT7411 trabalhe no modo Round-Robin, visto que, na configuração mais rápida possível, este demora mais do que o tempo escolhido para realizar as amostras. Sendo assim, o modo de operação do conversor analógico-digital deve ser o Single-Channel - no qual o dispositivo consegue realizar amostras a cada 44.5 micro segundos. Contudo, é sabido que no modo escolhido não é possível a obtenção das informações de tensão e corrente no mesmo instante. Ao fazer uso da idéia de que a tensão da rede elétrica é periódica, conclui-se que os valores das amostras para o período vigente provavelmente irão se repetir no ciclo seguinte. Assim, pode-se monitorar as informações do canal de tensão em um ciclo e, no seguinte, colher os dados do canal de corrente a fim de obter a potência média do aparelho, possibilitando o uso do modo Single-Channel. A Figura 4.1 ilustra essa idéia.

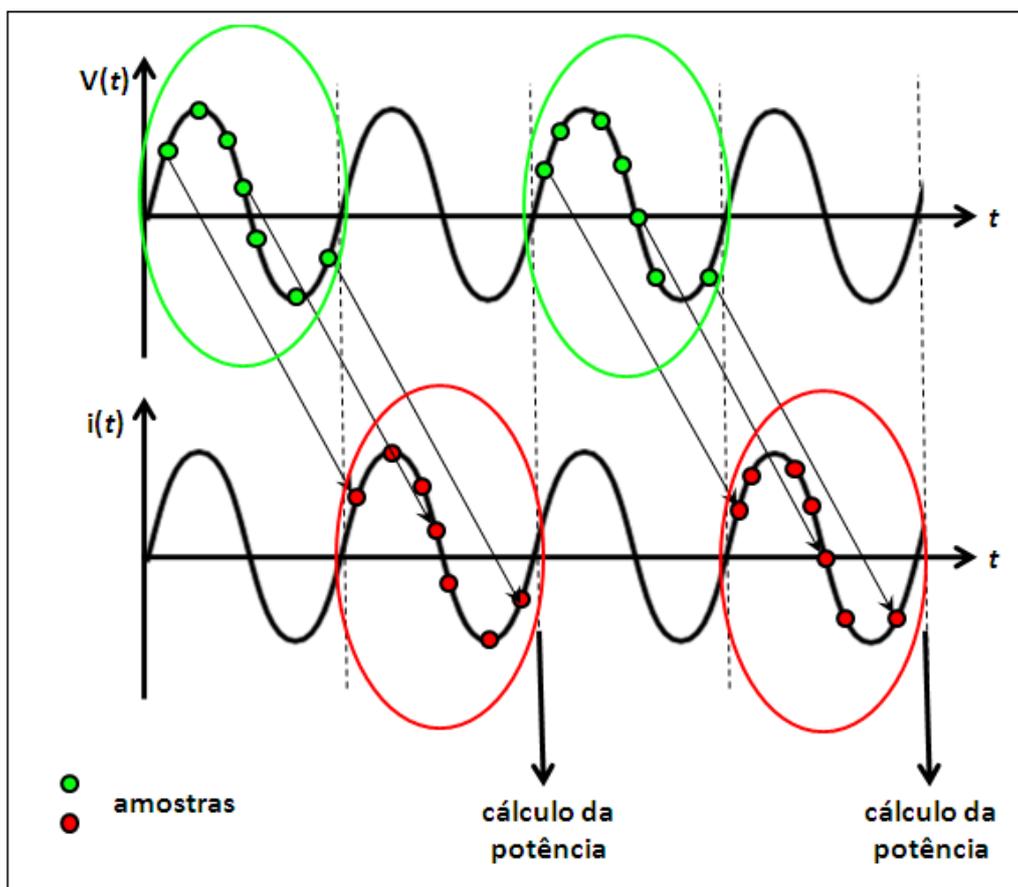


Figura 4.1. Solução para calculo da potência.

Para implementar essa solução, um algoritmo foi desenvolvido.

4.2 Apresentação do Algoritmo

Como visto na seção 4.1, as informações básicas que são precisas para a obtenção do valor de energia consumida são potência e tempo em que esta esteve presente. Primeiramente será apresentado como se obteve o valor da potência e energia consumida, e, em seguida, como foi obtida a informação do tempo.

4.2.1 Obtendo a informação da potência e energia consumida.

Seguindo a solução proposta, o algoritmo deve em um ciclo realizar uma amostra a cada 555 micro segundos em um canal (totalizando 30 amostras) e, no período seguinte, obter os dados referentes ao outro, para assim calcular a potência e estimar a energia consumida.

Para possibilitar essa implementação, é preciso ter um controle de quando se deve realizar uma amostra e de quando é necessário trocar o canal de amostragem. Assim, há a necessidade do uso de um temporizador ou contador.

Como descrito na seção 3.1.2, o Sun SPOT possui o dispositivo AT91, o qual pode ser usado como temporizador ou contador. A funcionalidade de temporizador é mais indicada para realizar tarefas periódicas, pois utiliza um mecanismo de interrupção para de tempos em tempos desenvolver a tarefa necessária. Já a outra funcionalidade tem como principal objetivo fazer a medição do tempo gasto em um intervalo. Com base nessas informações, teoricamente, conclui-se que o uso desse dispositivo como temporizador é a melhor solução para o caso da realização das amostras a cada 555 micro segundos, visto que essa é a situação na qual se deseja realizar uma tarefa periodicamente. Na prática essa funcionalidade não se comportou como descrito, pois mesmo configurando o AT91 para realizar tarefas na taxa desejada, foi observado que ele sempre demorava mais do que o dobro do tempo necessário para voltar da interrupção. Segundo [GOLDMAN] isso se deve ao fato de que às vezes a interrupção pode sofrer um atraso devido a ela ocorrer durante o mecanismo de *Garbage Collector* ou durante uma operação nativa de grande duração ou enquanto uma thread de maior prioridade está sendo executada. Pelos seus testes, o atraso dessa interrupção poderia variar de 1 a 3 milésimos de segundo como poderia durar de 20 a 30 ms. Por esses motivos, optou-se por não utilizar a funcionalidade de temporizador e escolher o modo de contador.

Usando o AT91 como contador, deve-se monitorar constantemente o seu valor para decidir se é o momento de realizar uma tarefa ou se é necessário esperar mais tempo. É possível, ainda, escolher com qual frequência o dispositivo irá incrementar o seu valor, assim, pode-se ter contadores com precisões diferentes. Desse modo, há a possibilidade de se ter um contador rápido para monitorar se é momento de realizar amostragem e um contador lento para verificar se é momento de troca do canal de amostragem (quando terminar o ciclo da onda).

Sendo assim, o algoritmo implementado utiliza dois contadores, um contador rápido – que é incrementado com uma frequência de 29.952 KHz - para saber se é momento de realizar uma amostra e um contador lento – que é incrementado com uma frequência de 32,768 KHz – para saber se um ciclo já foi finalizado. O fluxograma desse procedimento é dado na Figura 4.2.

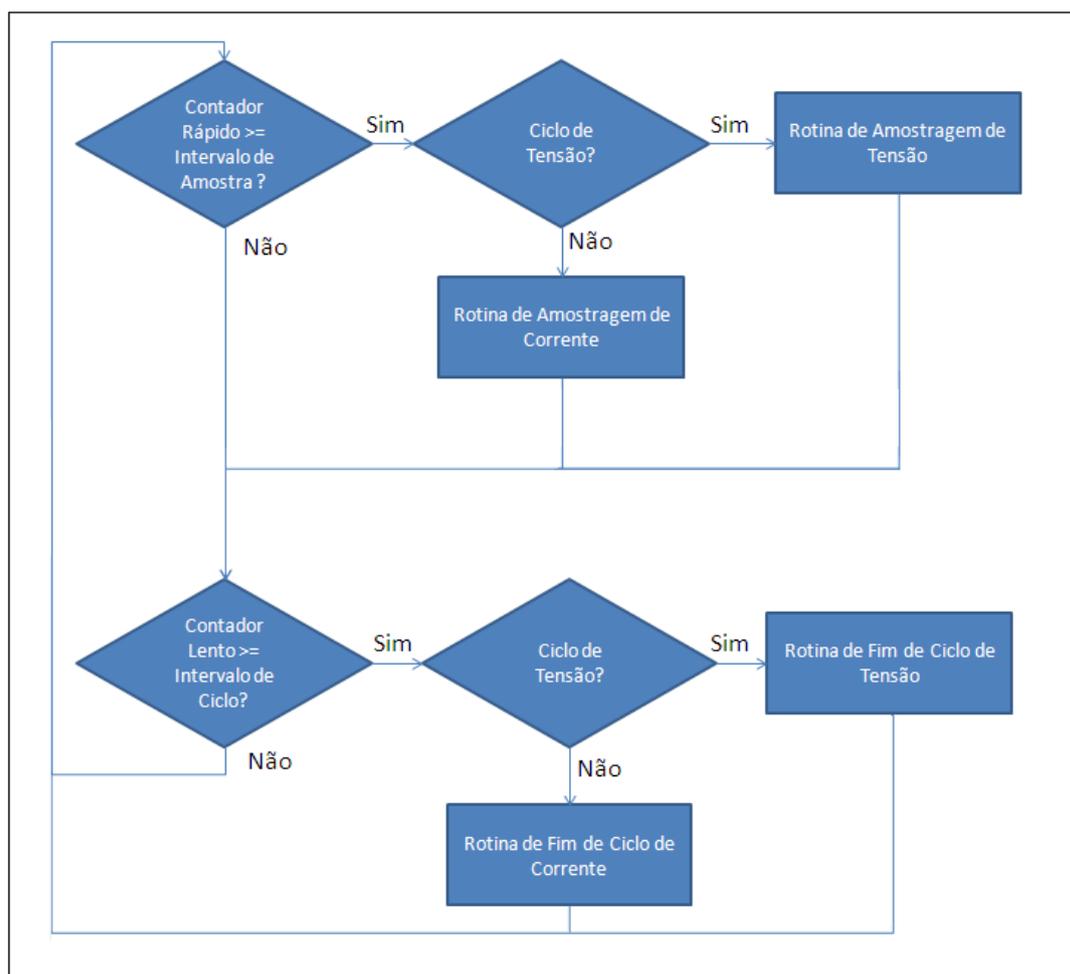


Figura 4.2. Fluxograma do procedimento.

Quando o contador rápido possui um valor maior ou igual ao valor do intervalo de amostragem, esse fato indica que chegou o momento de um dado ser amostrado.

Primeiramente é amostrado o canal de tensão, guardando-se as 30 amostras em um vetor de amostras deste canal. Após a última amostra ser realizada ou o temporizador lento indicar que o canal de amostragem deve ser trocado, o canal de corrente é selecionado e, assim como é feito para a tensão, cada amostra é armazenada em um vetor de amostras deste canal. Ao se completar todas as amostras necessárias, deve-se calcular a potência média. Para isso deve-se calcular o somatório da multiplicação de cada valor de tensão pelo respectivo valor de corrente e, por fim, dividir esse valor pelo número total de amostras, no caso, 30. A fim de otimizar o tempo do algoritmo, a cada valor de corrente obtido, efetua-se a multiplicação deste valor pelo respectivo valor de tensão e o resultado é somado à uma variável que representa a potência média. Assim, no final do segundo ciclo de onda amostrado (ciclo da corrente) deve-se apenas dividir esse dado pelo número de amostras, obtendo-se assim a potência média do período.

Com a potência média calculada, precisa-se saber o tempo decorrido para assim estimar a energia consumida.

4.2.2 Obtendo a informação do tempo decorrido.

Utilizando a solução de em um ciclo de onda realizar amostras de tensão e no ciclo seguinte realizar amostras de corrente, pode-se afirmar que o tempo decorrido nesse processo equivale a duas vezes o período da onda senoidal de 60Hz. Portanto tem-se um tempo definido para poder estimar a energia consumida.

A máquina virtual Java Squawk possui múltiplos espaços de execução independentes e cada espaço compreende um conjunto de threads. Assim, é possível ter aplicações multi-thread no SunSPOT. Ainda, o projeto que foi desenvolvido é utilizado como uma thread de micro-medição dentro do projeto de mestrado do Lucas B. Torri. Por esse motivo, há o compartilhamento de recursos dentro dessa plataforma de hardware e, assim, nem sempre será possível realizar todas as amostras necessárias dentro do período preciso. Para estimar a energia consumida pelo dispositivo nesses casos, utiliza-se a última potência calculada e a informação de quanto tempo se passou.

Para saber o tempo decorrido é utilizado o valor do contador lento. Ao terminar de amostrar um ciclo de tensão, armazena-se o valor deste contador em uma variável, obtendo assim o tempo levado para se obter as amostras deste ciclo. O contador é então zerado e passa a marcar o tempo até que se chegue no final do período do ciclo da corrente. Sendo assim, basta somar o tempo armazenado com o que está sendo marcado para saber qual foi a duração do processo. Por vezes, o processo pode ser interrompido e não sendo possível a obtenção de todas as amostras. Nesse caso, para estimar a energia consumida, utiliza-se o último valor calculado para a potência média e, para descobrir o tempo decorrido, basta utilizar o valor armazenado no contador lento.

4.2.3 Fluxograma completo do algoritmo.

Antes de começar a rotina de amostragem e cálculos de energia, deve-se configurar o conversor analógico-digital e os contadores para que estes operem com as características desejadas. Para isso, faz-se uso de uma rotina de inicialização e o fluxograma é apresentado na Figura 4.3.

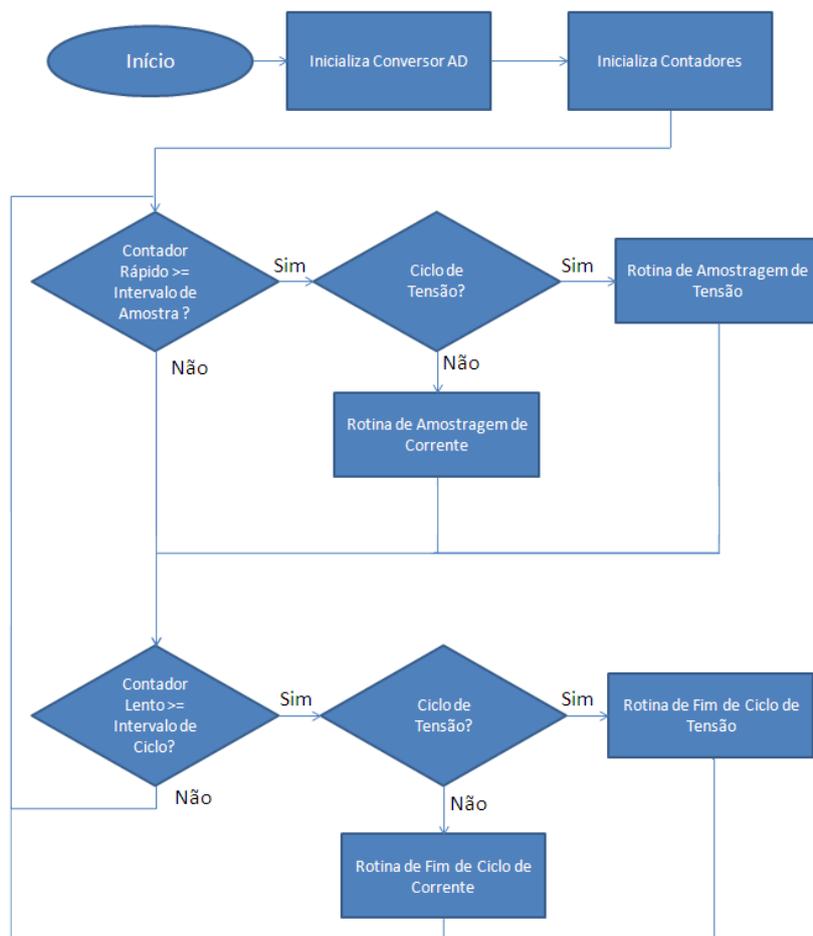


Figura 4.3. Fluxograma completo do algoritmo.

A seguir será apresentado como realizar a configuração do conversor analógico-digital e a velocidade dos contadores.

4.3 Configurando o Conversor Analógico-Digital

Segundo o [ADT7411-DATASHEET], o ADT7411 tem como configuração inicial o modo de operação Round-Robin, a realização de médias das amostras e a velocidade lenta para a realização destas. A fim de conseguir obter o intervalo de amostragem desejado, as decisões de projeto escolhidas exigiam que o conversor trabalhasse em modo Single-Channel sem realizar média das amostras e com alta frequência. Para tanto houve a necessidade de configurar o conversor com tais características.

O ADT7411 possui registradores de oito bits que podem ser acessados via comunicação serial SPI. Alguns dos registradores permitem tanto a escrita de dados quanto a leitura e o SunSPOT possui uma classe para facilitar esse acesso. Para isso, deve-se importar a biblioteca `com.sun.spot.sensorboard.hardware.IADT7411` no código e criar uma instância do IADT7411. Assim, para se ler o valor de um registrador, basta fazer uma chamada do método `read()`, o qual é implementado por esse objeto, passando o endereço do registrador em que se deseja realizar a leitura. Já, para gravar um dado

em um deles, utiliza-se o método *write()* passando o endereço do registrador e o valor a ser escrito.

Alguns registradores são utilizados para armazenar os resultados das amostras e outros controlam as configurações do dispositivo. A seguir, serão apresentados os registradores de configuração utilizados para selecionar as características desejadas de operação.

4.3.1 Registrador de controle de configuração 1 (endereço 18h)

Esse registrador pode ser utilizado para habilitar a monitoração dos canais de amostragem, selecionar entre amostrar a temperatura externa ou canais AIN1 e AIN2, habilitar e configurar polaridade de interrupções e entrar em modo de baixo consumo. Ele foi configurado para realizar amostras nos canais AIN1 e AIN2 (canal de tensão e corrente, respectivamente) e para começar a realizar amostras. Pode ser acessado no endereço 18h.

A Tabela 4.1 apresenta a funcionalidade de cada bit de configuração deste registrador e o valor escolhido para cada configuração.

Tabela 4.1. Registrador de configuração 1 [ADT7411-DATASHEET].

Bit	Funcionalidade	Valor Escolhido
C0	Habilita ou desabilita a monitoração dos canais	1 : Habilita monitoração
C2:C1	Seleciona realizar amostras nos pinos de canal analógico AIN1 e AIN2 ou temperatura externa	00: Seleciona AIN1 e AIN2
C5	Habilita ou desabilita interrupções	1 : Desabilita interrupções

A Figura 4.4 apresenta trecho de código responsável por selecionar essa configuração.

```

short cnfg;
short addr;

addr = 0x18;
cnfg = adt.read((byte)addr);
cnfg &= 0xF9; // C1:C2 = 00 (seleciona AIN1 e AIN2)
cnfg |= 0x01; // C0 = 1 (começa a monitoração)
cnfg |= 0x20; // C5 = 1 (desabilita Interrupção)
adt.write((byte)addr,(byte)cnfg);

```

Figura 4.4. Trecho de código Java para configurar registrador de configuração 1.

4.3.2 Registrador de controle de configuração 2 (endereço 19h)

Esse registrador foi utilizado para selecionar o modo de operação do conversor analógico-digital, escolher canal de amostragem e para alterar configuração de habilitar

média de amostras. A Tabela 4.2 apresenta a funcionalidade dos bits de configuração desejados e seus respectivos valores.

Tabela 4.2. Registrador de configuração 2 [ADT7411-DATASHEET].

Bit	Funcionalidade	Valor Escolhido
C3:C0	Seleciona canal que será amostrado em modo Single-Channel	0010 : Seleciona canal AIN1
C4	Seleciona modo de operação em Round-Robin ou Single-Channel	1 :Seleciona Single-Channel
C5	Habilita ou desabilita média das amostras	1 : Desabilita média das amostras.

A Figura 4.5 apresenta trecho de código responsável por selecionar a configuração desejada.

```
short cnfg;
short addr;

addr = 0x19;
cnfg = adt.read((byte)addr);
cnfg &= 0xCF; //11001111
cnfg |= 0x20; // Desabilita média de amostras
cnfg |= 0x10; // Seta Single Channel
cnfg &= 0xF0; // Limpa C3:C0
cnfg |= 0x02; // 0010 = AIN1 do adt = AO do Spot
adt.write((byte)addr,(byte)cnfg);
```

Figura 4.5. Trecho de código Java para configurar registrador de configuração 2.

4.3.3 Registrador de controle de configuração 3 (endereço 1Ah)

Esse registrador contém a configuração para realizar conversões com a velocidade rápida ou a velocidade lenta. O bit responsável por esse controle é o C0. Se ele receber o valor 1, os filtros analógicos são desabilitados e assim o ADT7411 passa a trabalhar com a velocidade rápida de conversão.

A Figura 4.6 apresenta o trecho de código responsável por selecionar essa configuração.

```
short cnfg;
short addr;

addr = 0x1A;
cnfg = adt.read((byte)addr);
cnfg |= 0x01; // seleciona bit 1 (velocidade rápida)
adt.write((byte)addr,(byte)cnfg);
```

Figura 4.6. Trecho de código Java para configurar registrador de configuração 3.

4.4 Configurando os Contadores

A solução desenvolvida precisa de dois contadores, um que tem a funcionalidade de marcar o tempo em que as amostras devem ser realizadas. Outro para verificar quando um ciclo foi completo e guardar a informação do tempo decorrido.

O contador que marca o tempo das amostras deve ter uma frequência de incremento rápida o bastante a fim de ser capaz de indicar o momento correto da realização de uma amostra. Para isso, usou-se da frequência mais rápida disponível no SunSPOT, a qual incrementa o valor do contador a cada 0.0334 micro segundos, e pode contar até 2.188 milésimos de segundo.

Já, o contador responsável por verificar a periodicidade do ciclo de 60Hz e armazenar o tempo decorrido, não necessita ter uma frequência de incremento tão rápida, bastando apenas ter a resolução suficiente para marcar o momento em que o canal de amostragem deve ser trocado. Assim, foi escolhida a frequência de incremento mais lenta possível, fazendo com que o contador tenha seu valor incrementado a cada 30.5176 micro segundos e possa contar até dois segundos.

O SunSPOT possui uma classe que facilita a configuração e uso desses contadores. Para poder utilizá-la, deve-se importar a biblioteca *com.sun.spot.peripheral.IAT91_TC*. Assim, foram criadas duas instâncias da classe IAT91_TC para os contadores, uma para o contador rápido e outra para o lento. Para configurar os contadores, faz-se uso do método *configure()*, o qual recebe como parâmetros o modo em que o temporizador AT91 irá trabalhar e a velocidade em que ele terá seu valor incrementado. Ambos irão operar em modo de captura. A Figura 4.7 apresenta o trecho de código para selecionar a configuração desejada.

```
// Configura contador para contar intervalo das amostras
counter = Spot.getInstance().getAT91_TC(1);
counter.configure(
    TimerCounterBits.TC_CAPT |           // modo de captura
    TimerCounterBits.TC_CLKS_MCK2       // frequencia rápida
);
counter.enableAndReset();

// Configura contador para contar intervalo dos ciclos
slowCounter = Spot.getInstance().getAT91_TC(0);
slowCounter.configure(
    TimerCounterBits.TC_CAPT |           // modo de captura
    TimerCounterBits.TC_CLKS_SLCK       // frequencia lenta
);
slowCounter.enableAndReset();
```

Figura 4.7. Trecho de código Java para configurar os contadores.

4.5 Adquirindo Amostras

No modo de operação Single-Channel, após terminar a conversão de um dado, o conversor analógico-digital ADT7411 já começa a realizar a próxima conversão. Assim,

sempre se tem armazenado o valor da última amostra nos seus devidos registradores, podendo, a qualquer instante, realizar uma leitura desta informação.

Como apresentado na seção 3.1.1, o conversor utilizado fornece amostras de 10 bits de resolução (cada uma podendo assumir valores entre 0 e 1023), porém os seus registradores são de 8 bits. Logo, para armazenar o valor de uma amostra, é preciso guardar os dados em um registrador inteiro e os bits faltantes em outro. O ADT7411 realiza esse procedimento de forma que os bits mais significativos sejam armazenados em um único registrador e os dois bits de menor expressão fiquem guardados em outro. Certas aplicações podem não precisar de 10 bits de resolução, nesse caso basta-se ler o registrador que contenha os bits mais significativos da amostra do canal desejado. Para as aplicações que precisam da resolução completa, há uma ordem de leitura que deve ser respeitada. Deve-se primeiramente realizar a leitura no registrador que contenha os bits menos significativos e, após essa operação, deve-se ler o valor do registrador que contenha os bits mais significativos. Isso se deve ao fato de que se a aplicação ler primeiramente os bits mais significativos, o ADT7411 pode sobrescrever o valor dos bits faltantes com um novo valor de amostra, tornando os dados inconsistentes. Já, se a primeira leitura for feita no registrador dos bits menos significativos, o outro registrador associado ao canal é bloqueado, só sendo liberado após a realização de uma operação de leitura sobre ele. Tal fato garante a consistência dos dados lidos e foi assim implementado no desenvolvimento do projeto.

Os canais que são utilizados para realizar as amostras de tensão e corrente são os AIN1 e AIN2, respectivamente. Um valor amostrado de tensão possui seus 2 bits menos significativos armazenados nos bits D1:D0 do registrador de endereço 04h, enquanto que o restante da informação encontra-se no registrador de endereço 08h. Já os bits menos significativos referentes a uma amostra de corrente encontram-se nas posições D2:D1 do registrador de endereço 04h e os mais significativos encontram-se no registrador de endereço 09h.

Como visto, após a amostragem, os dados obtidos são armazenados com valores entre 0 e 1023. Porém, nesse formato esses valores são apenas números e não agregam muita informação à primeira vista. Para que eles deixem de serem apenas números e passem a ser interessantes à aplicação, precisam ser convertidos para suas verdadeiras medidas – Volt no caso da tensão e ampère para a corrente.

Para realizar a conversão desses valores para suas verdadeiras medidas, o primeiro passo é converter o valor lido no registrador para o valor de tensão amostrado. Como o maior valor permitido nos pinos de entrada analógica do SunSPOT deve ser de no máximo 3 volts e, sabendo que, o maior valor de conversão possível pelo ADT7411 é 1023, então, o valor amostrado deve ser igual a 3Volts multiplicado pelo valor lido do registrador dividido por 1023.

Como apresentado no capítulo 2, os valores de tensão e corrente do aparelho elétrico monitorado são fornecidos pelo micro medidor *Kill-a-Watt*. Esses sinais excursionam de 0 a 4.5 volts e após passarem pelo circuito divisor de tensão, tem seu sinal variando de 0 a 3 volts. Esses sinais representam valores de tensão e corrente alternada e o valor de 1,5 volt equivale ao nível de tensão zero. Portanto, ao realizar uma amostra cujo valor seja 1.5, ela será equivalente ao valor 0 de tensão ou corrente verdadeira, ou seja, para ajustar o sinal, deve-se subtrair o valor 1.5.

Para descobrir o valor de tensão ou corrente verdadeira, só resta um passo, que é saber qual o limite máximo para cada sinal. Como mostra a seção 3.2, o valor máximo para corrente é de 15 ampères e para a tensão, a máxima equivale a 125VAC. Assim, para se recuperar o verdadeiro valor de uma amostra, o último passo é multiplicá-lo pelo seu limite máximo.

A Figura 4.8 mostra o trecho de código referente à aquisição e recuperação do valor real de para uma amostra de tensão.

```
private double GetPinVoltage() throws IOException
{
    // tensão está no AIN1
    // Registrador que contém LSB de AIN1: 04h
    // D0 : LSB of AIN1
    // D1 : Bit 1 do AIN1
    short addr = 0x04;
    short LSB = adt.read((byte)addr);
    LSB &= 0x03;
    // Registrador que contém MSB de AIN1: 08h
    addr = 0x08;
    short MSB = adt.read((byte)addr);
    MSB &= 0xFF;
    MSB = (short)(MSB << 2);
    MSB |= LSB;

    return ((((((double)MSB)*vRef)/1023)-v0)*MaxVoltage);
}
```

Figura 4.8. Trecho de código para aquisição de amostra de tensão.

A Figura 4.9 mostra o trecho de código referente à aquisição e recuperação do valor real de para uma amostra de corrente.

```
private double GetPinCurrent() throws IOException
{
    // corrente está no AIN2
    // Registrador que contém LSB de AIN2: 04h
    // D2 : LSB of AIN2
    // D3 : Bit 1 do AIN2
    short addr = 0x04;
    short LSB = adt.read((byte)addr);
    LSB &= 0x0C;
    LSB = (short)(LSB >> 2);
    // Registrador que contém MSB de AIN2: 09h
    addr = 0x09;
    short MSB = adt.read((byte)addr);
    MSB &= 0xFF;
    MSB = (short)(MSB << 2);
    MSB |= LSB;

    return = ((((((double)MSB)*vRef)/1023)-i0)*MaxCurrent);
}
```

Figura 4.9. Trecho de código para aquisição de amostra de corrente.

5 APRESENTAÇÃO E VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS

Esse capítulo apresentará o que foi preciso para validar os resultados, como foi feita essa validação e, por último, os resultados obtidos em cada cenário.

5.1 Etapas para validação

O processo de validação dos resultados passou por três fases. A primeira foi de verificar se os valores de tensão e corrente adquiridos pelo Sun SPOT estavam de acordo com o esperado. Tendo estes valores validados, tornou-se possível a segunda etapa de validação, que era a de verificar se a potência e energia consumida estavam sendo estimadas com satisfação. A terceira etapa consistiu em verificar o comportamento da solução desenvolvida após a integração com o trabalho do Lucas Torri.

Para validar os valores de corrente e tensão adquiridos, era preciso verificar se o tempo entre as amostras estava sendo respeitado, se o tempo para finalizar um ciclo de tensão e começar um ciclo de corrente também era válido e se os valores de tensão e corrente amostrados pelo conversor analógico-digital estavam sendo transformados para valores reais de tensão e corrente corretamente.

Para validar se a potência e energia consumida estavam sendo estimados com satisfação, era necessário realizar uma comparação entre os valores mostrados pelo micro-medidor Kill-a-Watt e os valores obtidos pelo Sun SPOT.

Para validar a integração com o trabalho do Lucas Torri, além de haver a necessidade de comparar os valores do Kill-a-Watt com os valores obtidos pelo Sun SPOT, foi necessário verificar se o módulo de medição estava conseguindo realizar todas as conversões e cálculos antes de ser preemptado pelo sistema do Sun SPOT.

5.2 Metodologia da validação

Uma das formas de estabelecer comunicação entre um computador e o Sun SPOT é via cabo USB. Isso possibilita, em um terminal, visualizar as saídas de sistema que o dispositivo está enviando. Assim, esse mecanismo foi utilizado para obter e verificar os dados que o Sun SPOT estava produzindo. A seguir será explicado como foi feito para se obter as informações necessárias para validar cada etapa.

5.2.1 Validação de valores de Tensão e Corrente

Para realizar a primeira etapa de verificação (validar valores de tensão e corrente obtidos), informações como o intervalo entre as amostras e o valor calculado para cada uma eram necessários. O intervalo entre as amostras deve ser verificado para que se possa garantir que a taxa de amostragem está sendo respeitada. Esse intervalo deve ser

respeitado para que não haja falta de sincronismo entre o ciclo de tensão e o ciclo de corrente, e, pois o cálculo da potência média leva em consideração que todos os dados amostrados tiveram a mesma taxa de amostragem. Já, o valor da amostra, deve ser verificado a fim de garantir que os cálculos para se recuperar os valores de tensão e corrente verdadeiros estão sendo feitos adequadamente.

Sendo assim, para se obter esses dados, foi desenvolvida uma classe no Sun SPOT usada para armazenar as informações de tempo entre amostras, valor recuperado para a amostra e instante do ciclo em que a amostra ocorreu. A cada nova amostra, uma instância dessa classe era criada contendo essas informações e era armazenada em um vetor. Quando se iniciava um novo ciclo, era criado um novo vetor, e este ia sendo preenchido pelas novas amostras referentes ao novo ciclo, de forma que um histórico dos eventos ia sendo criado. Após um determinado tempo, a aplicação informava esse histórico para que fosse possível a análise dos dados.

Para validar o tempo entre as amostras, foi observado se cada intervalo estava respeitando o valor da taxa de amostragem. De acordo com a solução proposta, o intervalo entre as amostras deve ser de 555 micro-segundos, sendo assim, para ser validado, cada valor de tempo entre as amostras deve estar em torno de 555 micro-segundos.

Para validar os valores de tensão e corrente calculados houve dois passos, o primeiro foi a análise de forma de onda e o segundo foi a análise do valor obtido.

Para validar a forma de onda: com os dados obtidos através do histórico, foi reconstruído o sinal referente à tensão e o sinal referente à corrente para cada ciclo. Utilizando um osciloscópio, monitoraram-se os canais de entrada do conversor analógico-digital e, assim, os sinais puderam ser capturados. Desta forma, os sinais reconstruídos de tensão e corrente foram comparados com os obtidos pelo osciloscópio. Para serem válidos, devem possuir a mesma forma de onda.

Para validar os valores de tensão e corrente, foi comparado os valores obtidos pelo SunSPOT e os valores indicados no visor do Kill-a-Watt.

Para validar os dados, foi observado se o tempo de cada amostra estava respeitando a taxa de amostragem e, se a onda reconstruída para a tensão e para a corrente estavam de acordo com a visualizada na interface entre o Kill-a-Watt e o Sun SPOT

5.2.2 Validação de potência e energia consumida

Para validar os valores de potência e energia consumida que foram estimados pelo SunSPOT, o programa desenvolvido foi modificado de forma que ele fizesse uma média dos valores de potência, tensão e corrente rms. Assim, a cada 10 mil ciclos esses valores e a energia consumida (em kWh) eram disponibilizados e era possível estabelecer uma comparação com as informações indicadas no Kill-a-Watt.

5.2.3 Validação de integração

Uma das preocupações que havia no momento de integração era a de verificar o comportamento do programa desenvolvido, o qual seria usado como módulo de micro-medição. Sabendo que nesse momento, existiriam mais threads compartilhando os

recursos do Sun SPOT e não tendo a possibilidade de definir o tempo de execução para cada uma, haveria a possibilidade de não conseguir realizar todas as amostras de tensão e corrente tendo que usar a última potência calculada como base para estimar a energia consumida no período. Assim, um dado interessante para se observar no momento de integração foi o de quantos ciclos o cálculo da potência estava conseguindo ser realizado e quantos ciclos isso não foi possível.

5.3 Resultados Obtidos

Essa seção irá apresentar os resultados obtidos. Primeiramente será apresentado o resultado obtido para a verificação do cumprimento do intervalo de amostragem. Em seguida, serão apresentados os três cenários de testes realizados, um utilizando um equipamento desligado, outro usando uma lâmpada incandescente de 25 watts de potência e outro utilizando uma lâmpada fluorescente de 19 watts.

Para validar o cumprimento do intervalo de amostragem, foi gerado um gráfico do intervalo de amostragem pelo instante em que a amostra ocorreu dentro do ciclo, como ilustra a Figura 5.1

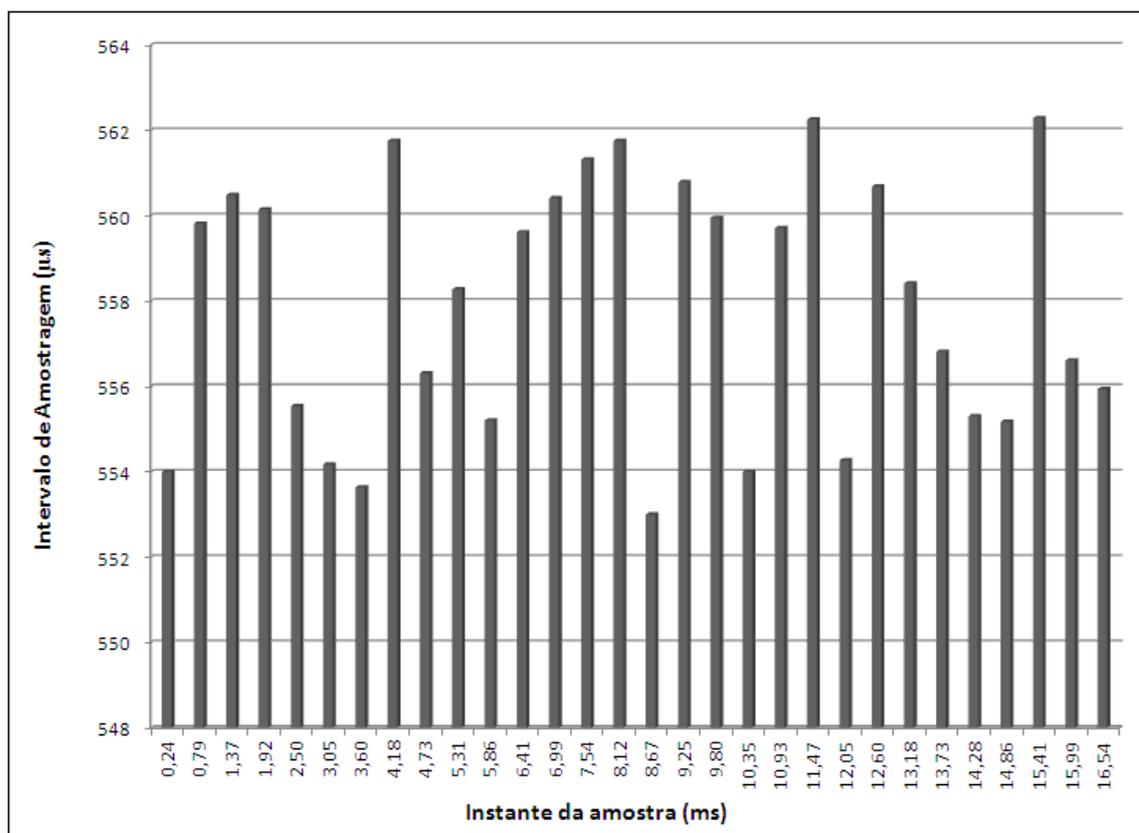


Figura 5.1. Gráfico do intervalo de amostragem pelo instante em que a amostra ocorreu.

Como pode ser observado, o menor intervalo de amostra ficou em 553,2 microssegundos, enquanto que o maior teve o valor de 562,2 µs. O valor médio desse intervalo

para esse ciclo teve o valor de 558 micro-segundos. Como o intervalo de amostragem ideal seria de 555 μ s, verifica-se que as amostras estão sendo realizadas com a taxa esperada e, portanto, pode-se considerar que o intervalo de amostragem está sendo respeitado.

A seguir, serão apresentados os resultados obtidos em cada cenário realizado.

5.3.1 Equipamento desligado

Utilizando um osciloscópio, os sinais de entrada referentes ao canal de tensão e ao canal de corrente do conversor analógico-digital foram monitorados. A Figura 5.2 ilustra o sinal de tensão capturado e a Figura 5.3 o sinal de corrente.

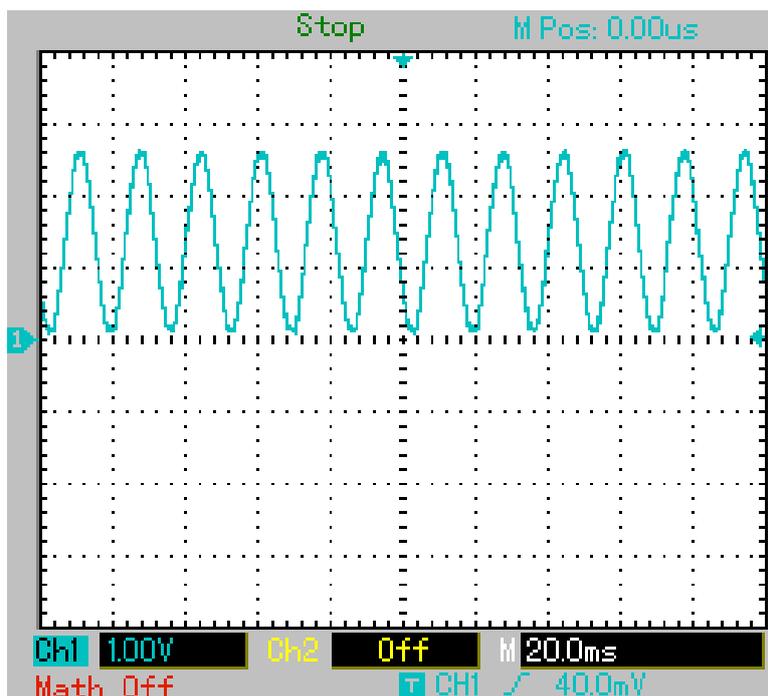


Figura 5.2. Sinal de tensão de entrada do Sun SPOT.

Como observado na Figura 5.2, o sinal referente à tensão varia entre 200 mV e 2,5V aproximadamente e possui uma frequência de 60Hz.

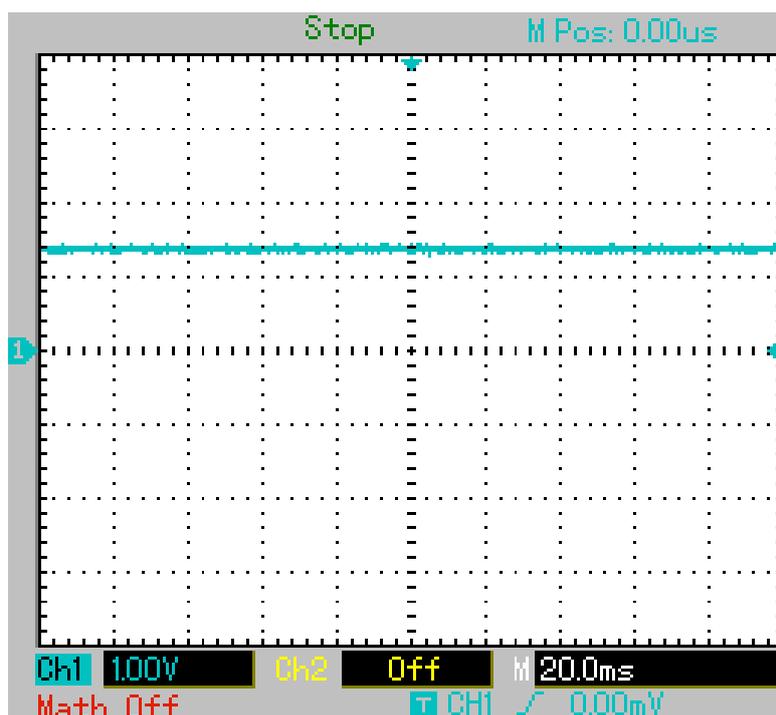


Figura 5.3. Sinal de corrente de entrada do Sun SPOT com equipamento desligado.

Como visto no capítulo 3, o sinal de entrada no Sun SPOT pode excursionar de 0 a 3 volts, sendo que o 0 representa o valor mais negativo do sinal, 3V representa o maior valor do sinal e 1,5V representa o zero. A Figura 5.3 mostra o sinal de corrente obtido por um equipamento desligado, ou seja, um equipamento que não estava consumindo energia, portanto, a corrente que ele utiliza deve ser zero, o que é representado pelo valor 1,5V visto na ilustração.

Embora pareça que o sinal de corrente de entrada no SunSPOT é constante em 1,5 volt (referente a corrente zerada), usando o modo de acoplamento AC no osciloscópio, é possível notar que esse sinal não é constante e possui um certo nível de ruído como mostrado na Figura 5.4. Esse ruído irá interferir no valor recuperado para a corrente e, por consequência, irá interferir no cálculo da potência e estimação da energia consumida.

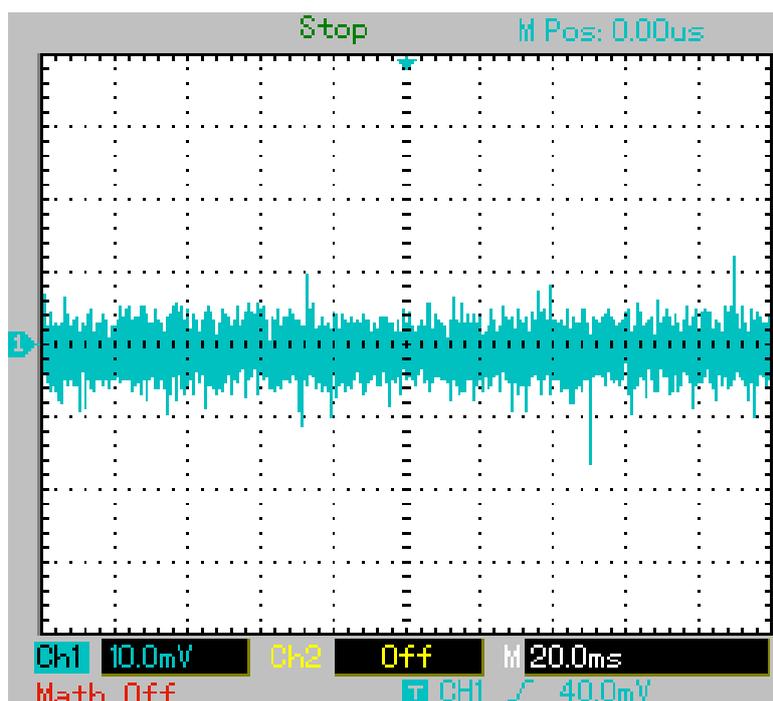


Figura 5.4. Ruído no sinal de corrente de entrada.

Usando os dados obtidos pelo Sun SPOT, foram recuperados os sinais de tensão e corrente, representados na Figura 5.5 e Figura 5.6 respectivamente.

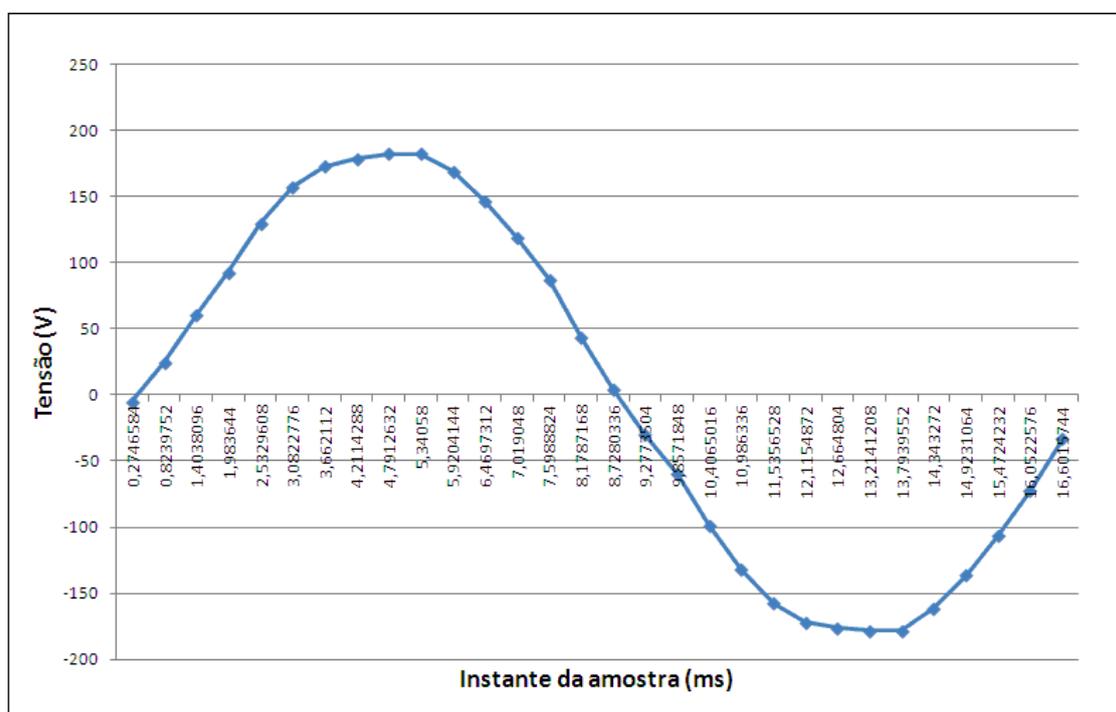


Figura 5.5. Sinal recuperado de tensão.

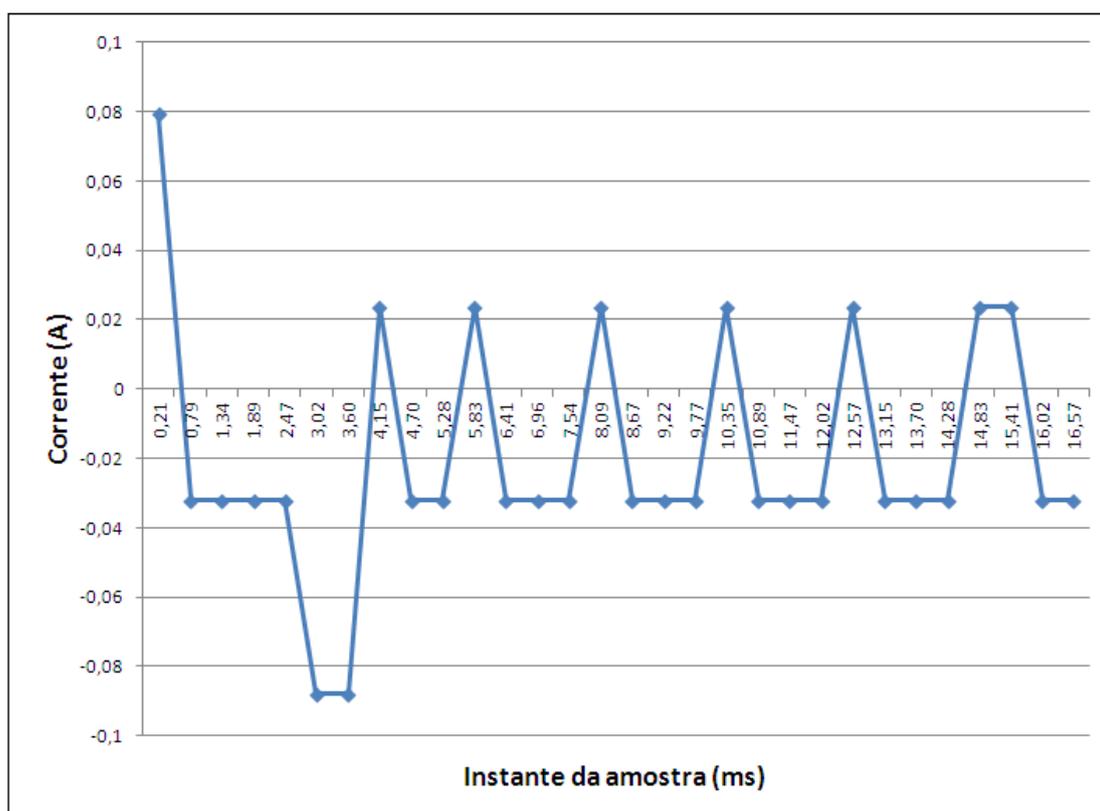


Figura 5.6. Sinal recuperado de corrente referente a equipamento desligado.

Comparando os sinais recuperados e os sinais de entrada, conclui-se que eles possuem a mesma forma de onda. Devido ao sinal recuperado de corrente possuir um nível de ruído, a potência calculada ficou diferente de zero, tendo seu valor médio em 3 Watts. Assim, quando um equipamento estivesse desligado, um valor de potência diferente de zero estaria sendo medido e, por consequência, acarretando um erro na estimativa de energia consumida. Para contornar essa situação, foi adicionado, via software, um mecanismo que só considera a existência de um valor válido de potência caso este seja maior do que três watts. Com isso, quando uma potência for calculada e tiver um valor inferior a esse número, será considerado que a potência do aparelho é zero.

5.3.2 Lâmpada incandescente

Para a realização deste teste, foi utilizada uma lâmpada incandescente de 25 watts de potência. Como a lâmpada utilizada não possui nenhum mecanismo de *dimmer*, o sinal de tensão de entrada no SunSPOT é igual ao sinal de tensão quando o aparelho estava desligado, visto que esse é o sinal de tensão da rede elétrica. O que diferencia a presença da lâmpada incandescente do equipamento desligado é a presença de um sinal de corrente diferente de zero.

Por se tratar de uma lâmpada incandescente, a corrente que passa por ela é alternada e acompanha o sinal de tensão da rede elétrica. A Figura 5.7 ilustra o sinal de entrada no canal de corrente do conversor analógico-digital capturado por um osciloscópio.

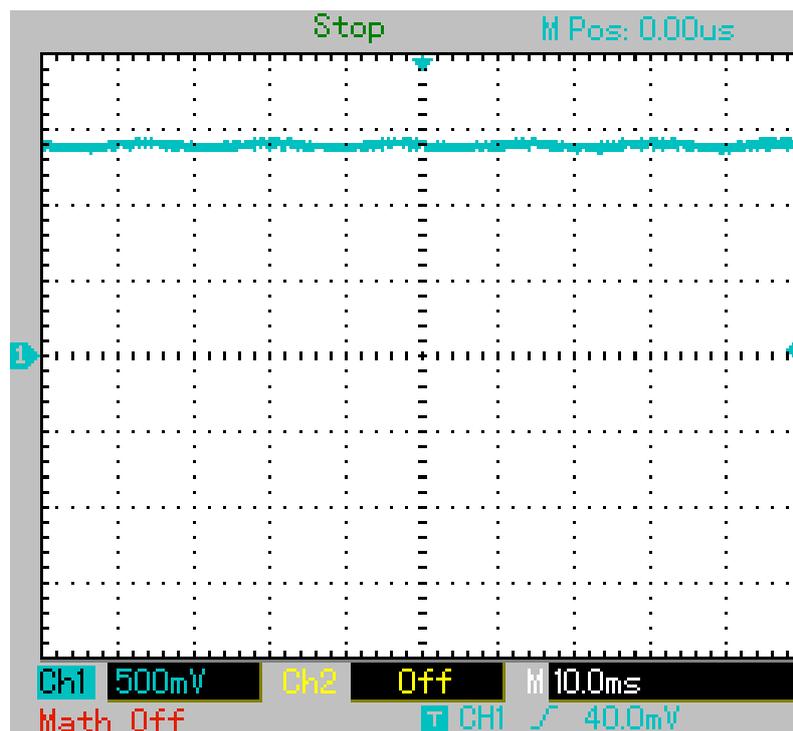


Figura 5.7. Sinal de corrente para lâmpada incandescente.

Como pode ser observado, o sinal de corrente fica oscilando com uma pequena amplitude. Essa oscilação é mais bem visualizada utilizando o modo de acoplamento AC do osciloscópio, ilustrada na Figura 5.8.

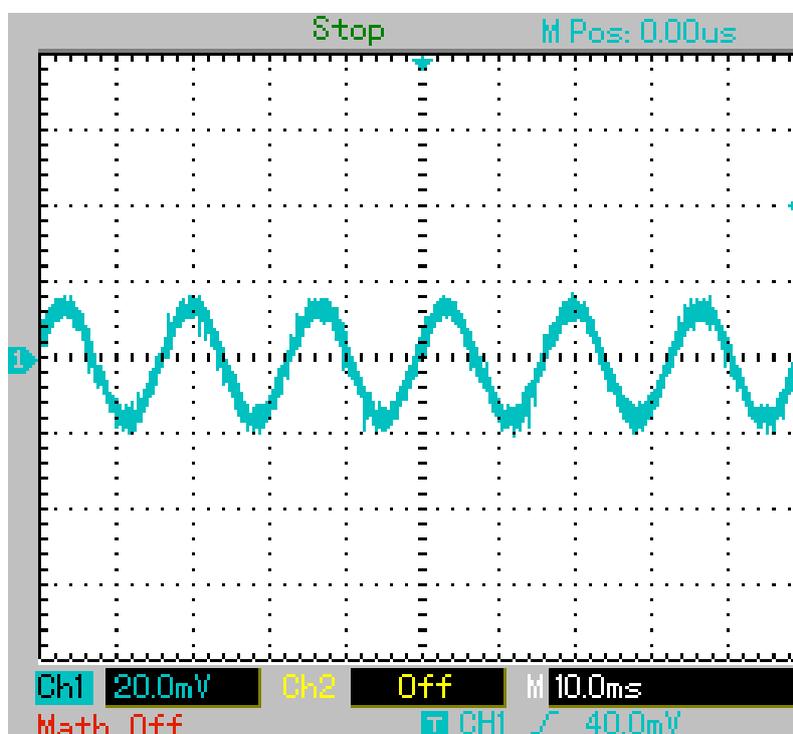


Figura 5.8. Sinal de corrente para lâmpada incandescente capturado com acoplamento AC.

Os sinais recuperados para tensão e corrente pelo Sun SPOT são apresentados na Figura 5.9 e na Figura 5.10, respectivamente.

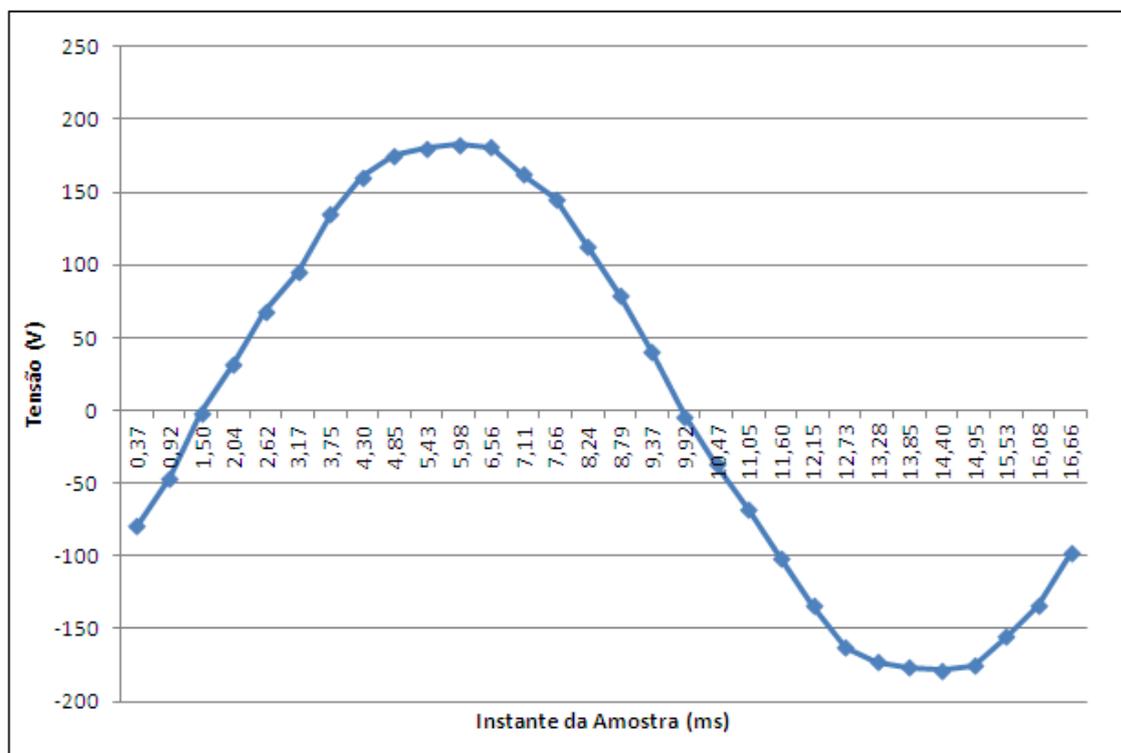


Figura 5.9. Sinal recuperado de tensão referente à luz incandescente.

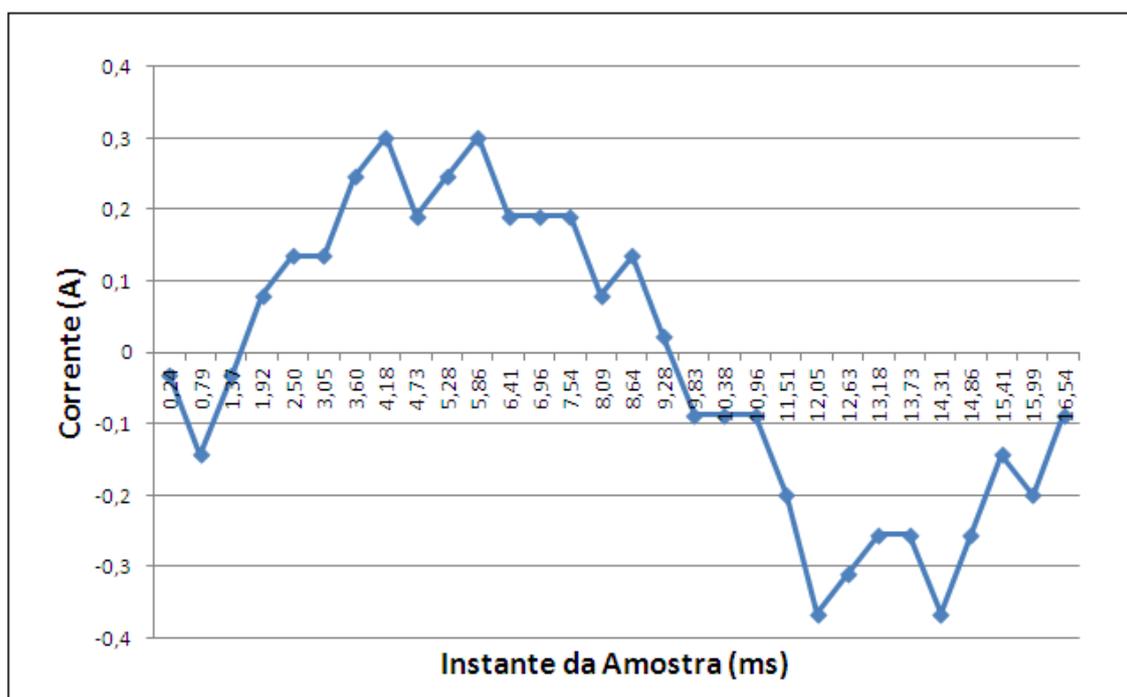


Figura 5.10. Sinal recuperado de corrente referente à luz incandescente.

Embora o sinal recuperado da corrente possua algumas imperfeições devido aos ruídos existentes, é possível observar que ele acompanha a forma de onda dada pela tensão. Comparando a Figura 5.9 com a figura 5.10, é possível perceber um pequeno deslocamento das amostras de corrente em relação às amostras de tensão. Isso se deve ao fato de que, mesmo que o mecanismo utilizado para controle dos tempos de amostragem tenha se mostrado satisfatório, ele não é completamente preciso.

A Tabela 5.1 apresenta os valores obtidos pelo Sun SPOT e os apresentados pelo Kill-a-Watt para tensão, corrente, potência e energia consumida.

Tabela 5.1. Comparação dos valores entre Sun SPOT e Kill-a-Watt para a lâmpada incandescente.

	SunSPOT	Kill-a-Watt
Tensão rms	130.1 Volts	128 Volts
Corrente rms	0.3 Ampère	0.19 Ampère
Potência	26.5 Watt	25.3 Watt
Energia Consumida durante 4 horas e 30 minutos	0.13kWh	0.12 kWh

Analisando a Tabela 5.1, pode-se notar que embora o Sun SPOT tenha calculado uma corrente maior do que a apresentada pelo equipamento, a potência e a energia

estimada mostram-se muito próximas ao valor apresentado pelo Kill-a-Watt, fato que torna o resultado obtido muito satisfatório.

5.3.3 Lâmpada fluorescente

Para a realização deste teste, foi usada uma lâmpada fluorescente de 19 watts de potência. Por não trabalhar com corrente alternada, a lâmpada fluorescente apresenta um sinal de corrente diferente da lâmpada incandescente, nos momentos de pico da tensão da rede elétrica, ocorre um pico no sinal da corrente e no restante do tempo, esta, permanece praticamente zerada. A figura 5.11 apresenta o sinal que o Sun SPOT recebe representando a corrente nessa lâmpada.

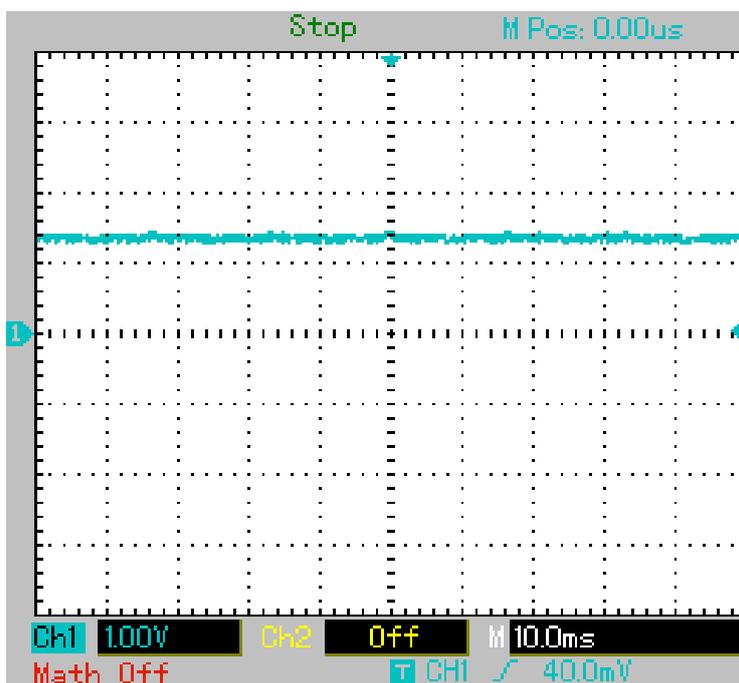


Figura 5.11. Sinal de corrente para lâmpada fluorescente.

Utilizando o modo de acoplamento AC do osciloscópio, é possível visualizar os momentos de pico de corrente, como ilustra a Figura 5.12.

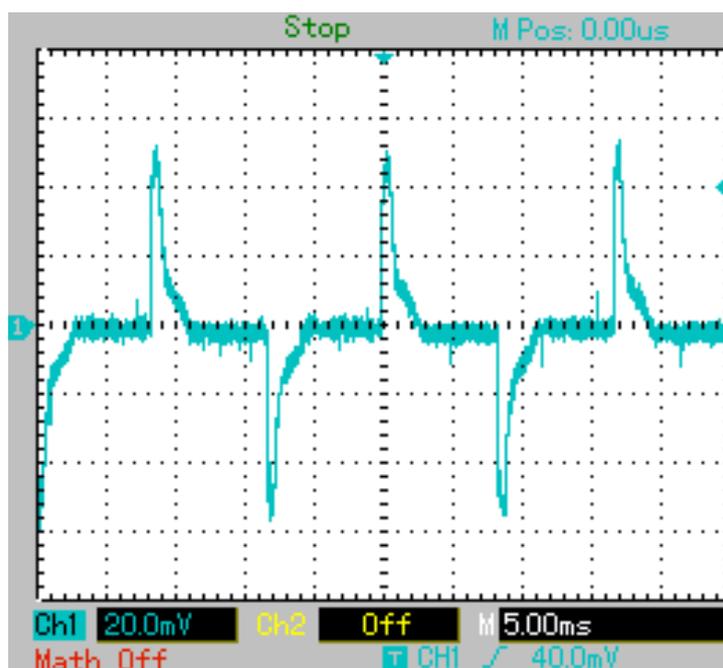


Figura 5.12. Sinal de corrente para lâmpada fluorescente capturado com acoplamento AC.

Os sinais recuperados pelo SunSPOT para tensão e corrente são apresentados na Figura 5.13 e na Figura 5.14, respectivamente.

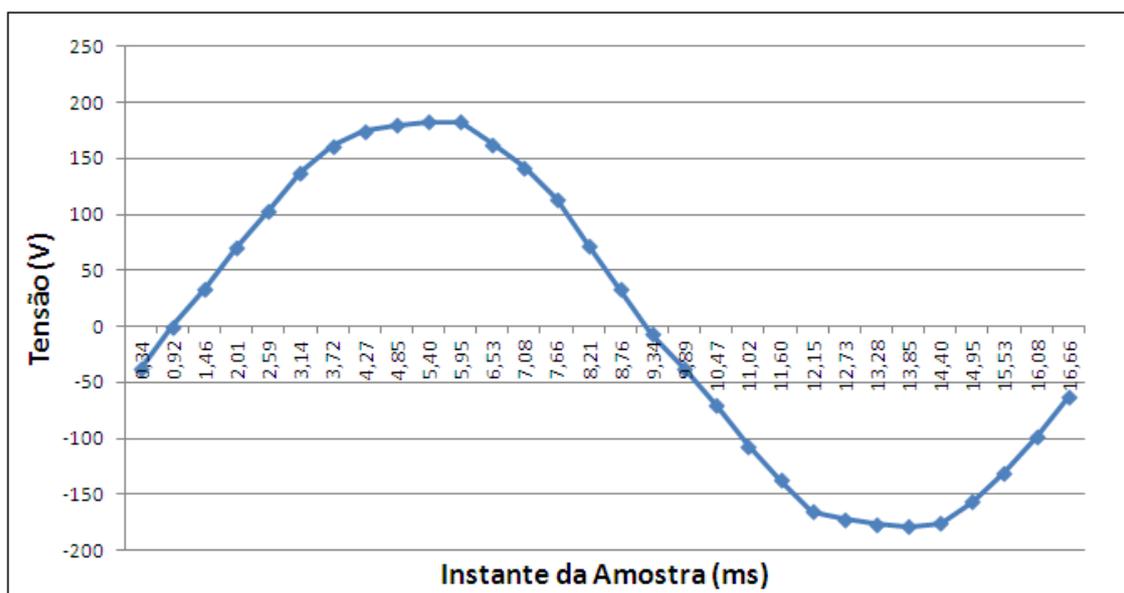


Figura 5.13. Sinal recuperado de tensão referente à luz fluorescente.

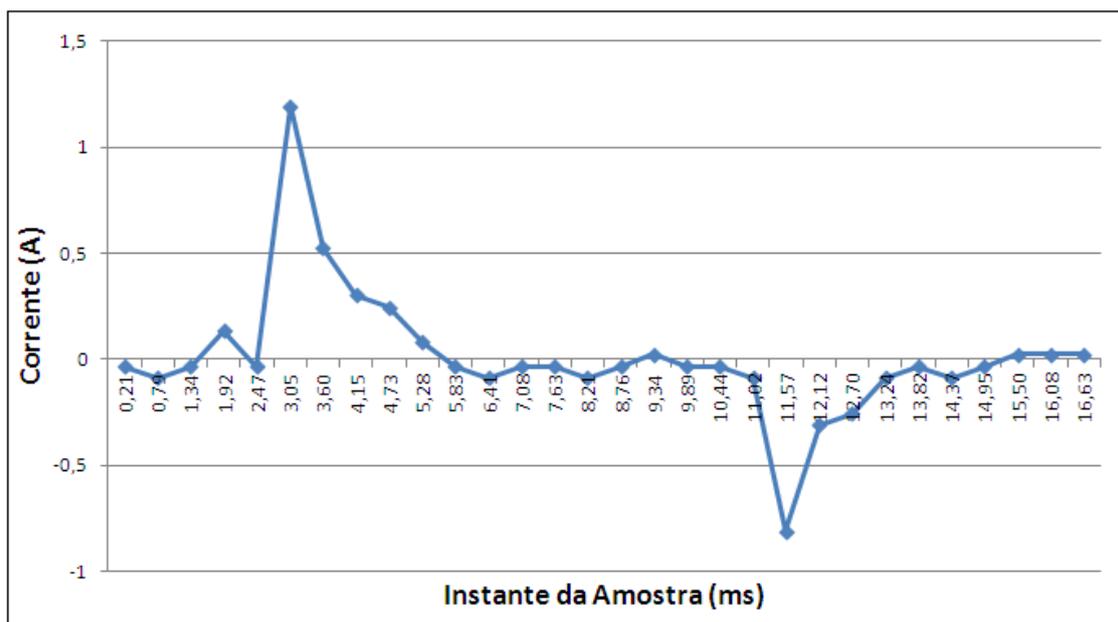


Figura 5.14. Sinal recuperado de corrente referente à luz fluorescente.

Tabela 5.2. Comparação dos valores entre SunSPOT e Kill-a-Watt para a lâmpada fluorescente.

	SunSPOT	Kill-a-Watt
Tensão rms	130.1 Volts	128 Volts
Corrente rms	0.4 Ampère	0.27 Ampère
Potência	19.2 Watt	18.9 Watt

Assim, pode-se verificar que a potência calculada está de acordo com a informada pelo Kill-a-Watt.

5.3.4 Integração com plataforma de micro-medição

Para validar a integração com a plataforma desenvolvida pelo Lucas B. Torri, teve de ser analisado uma importante questão: se o fato de ter outras threads compartilhando os recursos do Sun SPOT não afetaria a aquisição das amostras e o cálculo da potência e energia consumida. Foi verificado que depois da integração, o cálculo da potência e energia continuou sendo válido, porém a taxa com que ele era realizado diminuiu devido às preempções. A Figura 5.15 mostra os valores obtidos durante um dia de uso referentes à energia, tensão, corrente e potência para uma lâmpada de 20 watts, um laptop e uma TV após a integração entre os módulos.

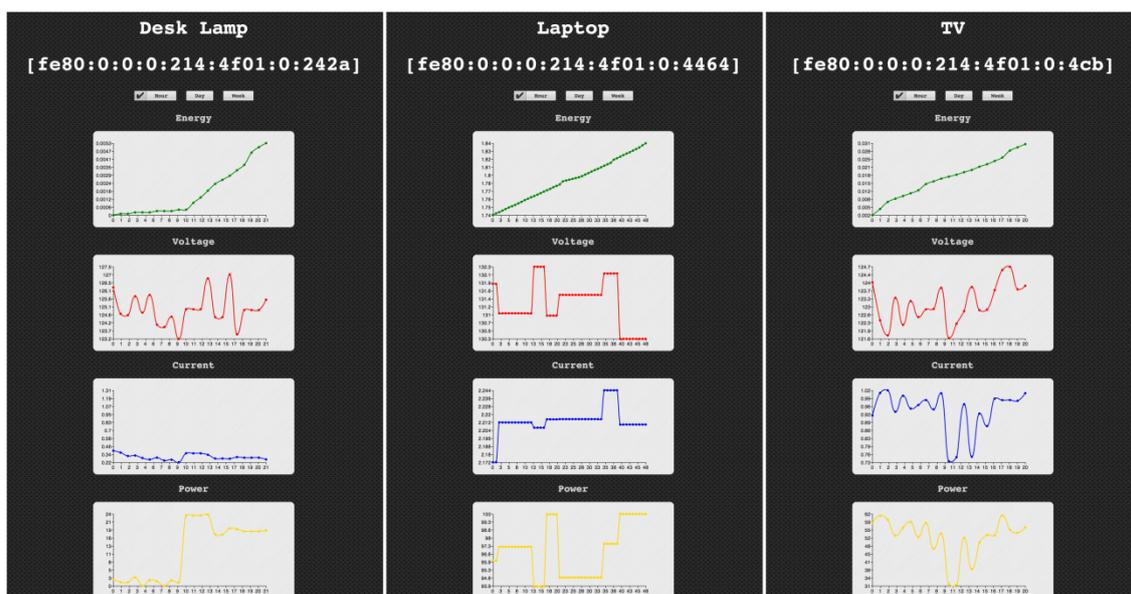


Figura 5.15. Valores obtidos após a integração dos módulos[TORRI].

6 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

Existem muitas razões para se acreditar no desenvolvimento da Smart Grid, sejam elas de caráter econômico ou ambiental. De qualquer forma, é certo que este novo modelo de energia irá trazer muitas melhorias tanto para o bolso dos consumidores quanto para um mundo mais limpo. Assim, abrem-se muitas oportunidades para o desenvolvimento de aplicações que possam explorar esse novo mercado. Entre elas, pode-se citar a idéia proposta neste trabalho.

Neste trabalho, foi desenvolvido um módulo para monitorar e medir o consumo de energia de aparelhos elétrico-eletrônicos utilizando o Sun SPOT, o qual pode prover um simples acesso a informações como tensão, corrente, potência e energia consumida. Dessa forma, o projeto desenvolvido pode ser utilizado como base para o desenvolvimento de uma plataforma a qual permita que um eletrodoméstico tenha seu grau elevado a uma *Smart Appliance*.

Para estimar a energia que um aparelho estava consumindo, foram realizadas amostras sobre o valor da tensão da rede elétrica e da corrente utilizada pelo aparelho. Com esses valores, foi calculada a potência do equipamento e, em seguida, estimada a energia consumida. As informações providas pelo módulo passaram por um processo de validação, o qual mostrou que embora os dados não sejam completamente precisos, eles são próximos dos valores reais e servem para se ter uma boa estimativa da energia consumida.

Devido ao fato de que para se trabalhar com amostras de intervalos bem definidos deve-se ter um controle preciso de tempo, houve um esforço para se conseguir implementar a solução proposta utilizando o Sun SPOT, visto que sua arquitetura não dispõe das ferramentas necessárias para esse controle. Além disso, foi verificada a presença de ruídos no sinal de corrente provido pelo micro-medidor Kill-a-Watt quando o aparelho em que se estava realizando a medição possuía baixa corrente. Tais fatos abrem espaço para a busca de novas soluções para o trabalho desenvolvido. Uma das alternativas que pode ser levada em consideração para trabalhos futuros é o uso do chip da Analog Devices ADE7757 para medição de energia, que é de baixo custo, possui dois conversores analógico-digitais, um circuito de referência e um processador de sinal digital dedicado para o cálculo da potência real.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AHAM – Association of Home Appliance Manufacture (Dezembro, 2009) “Smart Grid White Paper: The Home Appliance Industry’s Principles & Requirements for Achieving a Widely Accepted Smart Grid”.
- LITOS Strategic Communication (2009) “The Smart Grid: an Introduction”.
- ILLINOIS SECURITY LAB (2009) “AMI Security”
- NYSEG e RGE (2007) “Advanced Metering Infrastructure Overview and Plan”.
- SYNAPSE Energy Economics, Inc. (2008) “Advanced Metering Infrastructure – Implications for Residential Customers in New Jersey”.
- EUROPEAN TECHNOLOGY PLATFORM (2006) “Vision and Strategy for Europe’s Electricity Networks of the Future”.
- SUN MICROSYSTEMS, Inc. (2009) “Sun SPOT Theory of Operation Red Release 5.0”.
- LM2902-DATASHEET. Disponível em: < <http://www.datasheetcatalog.org/datasheet2/6/0ep2cg5u3zir6d7op48zff3518py.pdf> >. Acessado em: agosto de 2010.
- KILL-A-WATT-STEP11. Disponível em: < <http://www.instructables.com/id/Tweet-a-watt-How-to-make-a-twittering-power-mete/step11/Assemble-and-create-the-transmitter-5/> >. Acessado em: agosto de 2010.
- SPOT-DEVELOPER’S GUIDE (2009) “Sun™ Small Programmable object technology (Sun SPOT) Developer’s Guide”.
- GOLDMAN (2010) “Using the AT91 Timer/Counter - A Sun SPOT Application Note”
- ADT7411-DATASHEET. Disponível em: <http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/ADT7411.pdf>. Acessado em: Outubro de 2010.
- KILL-A-WATT. Disponível em: < <http://www.p3international.com/products/special/p4400/p4400-ce.html> >. Acessado em: Dezembro de 2010.
- TORRI (2011) “Uma proposta de plataforma extensível para micro medição em Smart Appliances”.