

IMPLEMENTAÇÃO DE MEDIDOR DE ENERGIA ELÉTRICA EM PLATAFORMA DE HARDWARE LIVRE PARA ESTUDO DO COMPORTAMENTO DE REDES INTELIGENTES

Edson T. Procopio – ed_taira@hotmail.com

Vitor C. Oliveira – vitor_chaves_oliveira@yahoo.com.br

Alexandre de A. Mota – amota@puc-campinas.edu.br

Lia T. M. Mota – lia.mota@puc-campinas.edu.br

Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Engenharia Elétrica

Faculdade de Engenharia Elétrica – Pontifícia Universidade Católica de Campinas

Rodovia D. Pedro I, km 136, Prédio H10 - Sala 603 - Campus I - 13086-900 – Campinas, SP

Resumo: Este trabalho apresenta instruções de construção e utilização de um medidor de energia elétrica capaz de fazer aquisições de dados com informações do funcionamento de redes inteligentes com cargas instaladas, utilizando como base uma plataforma de hardware livre - Arduíno. O principal objetivo desta implementação é introduzir o comportamento e requisitos de medição de energia em redes inteligentes, atuando como fonte de alimentação de cargas, através de amostras de níveis de tensão e corrente coletadas simultaneamente. Os resultados obtidos demonstram que o protótipo desenvolvido apresenta precisão e simplicidade compatíveis com experimentações com propósitos didáticos.

Palavras-chave: Redes Inteligentes, Medição Inteligente de Energia Elétrica, Aquisição de Dados, Modelagem da Carga, Hardware Livre.

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, tem sido muito difundido na literatura o conceito de redes inteligentes, ou *smart grids*. Isto se deve à necessidade, cada vez mais premente, de se utilizar a rede de energia elétrica como meio de comunicação, supervisão e controle, agregando valor a produtos que oferecem serviços e comodidade aos cidadãos, em especial pelas concessionárias de energia elétrica. (CPQD, 2009)

A presença de “inteligência” na rede elétrica estimula a utilização não somente como fonte de energia, mas também como rede de acesso a provedores de comunicação e serviços difusos. Com isso, torna-se de grande interesse a análise dos impactos que essa nova vertente de utilização pode apresentar. Em particular, a compreensão do comportamento elétrico de cargas instaladas nestas redes pode ser bastante favorecida através da consolidação de informações individualizadas de consumo em cada unidade instalada na rede, utilizando os próprios condutores de distribuição (em baixa e média tensão) como meio de propagação de informações sobre as variáveis elétricas em cada ponto de carga (tensão, corrente e fator de potência).

Neste contexto, o principal objetivo deste trabalho é descrever e apresentar a implementação de um medidor de energia em hardware livre, com propósitos didáticos, que seja capaz de apresentar as curvas de tensão e corrente que alimentam cargas instaladas em redes inteligentes.

2 O MEDIDOR DE ENERGIA

Basicamente, o circuito do medidor de energia implementado é constituído de:

- um circuito amostrador/aquisitor de níveis de tensão,
- um circuito amostrador/aquisitor de níveis de corrente e
- uma plataforma de hardware capaz de coletar amostras dos níveis de tensão e corrente, além de enviá-las para um computador.

2.1 Aquisição e Amostragem de níveis de tensão

O circuito de aquisição de níveis de tensão viabiliza a leitura do valor instantâneo de tensão que alimenta a carga na instalação, conforme ilustrado pela figura 1. O transformador de potencial (TP) tem uma relação de transformação de 10,58:1 do enrolamento primário para o secundário. A amostragem dos níveis de tensão e o posterior envio desses valores amostrados a um microcomputador foram implementadas dentro da plataforma de *hardware* livre Arduino.

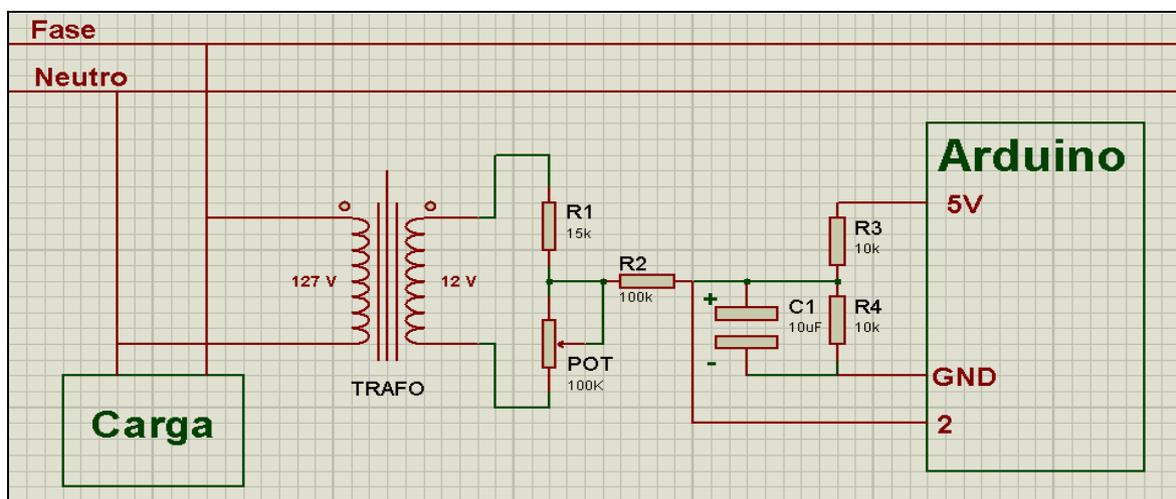


Figura 1 – Circuito medidor de tensão

O transformador tem a função de reduzir o nível de tensão na entrada da porta de entrada do sinal analógico na plataforma Arduino e isolar o circuito do medidor da rede elétrica. De acordo com o fabricante, a relação do transformador é de um nível de tensão na entrada de 127 volts (V) no enrolamento primário e de 12 V de saída no enrolamento secundário. Ligados na saída do transformador se encontram o resistor R1 e o potenciômetro POT, que formam um divisor de tensão, com o propósito de adequar o nível de tensão na porta de entrada analógica número 2 do Arduino. Na porta 2, essa tensão é associada a um valor de *offset* específico que eleva o nível do sinal em 2,5 V, valor de tensão contínua proveniente do divisor de tensão formado pelos resistores R3 e R4. Esse sinal de *offset* é necessário para liminar porções negativas do sinal na entrada, pois o microcontrolador presente na placa Arduino é capaz de realizar a leitura apenas de valores de tensão positivos. Finalmente, o capacitor C1 é utilizado para reduzir o nível de ruído que pode existir no sinal de entrada.

2.2 Aquisição e Amostragem de níveis de corrente

Nesse caso, a leitura é viabilizada por um transformador de corrente (TC), que converte a intensidade de corrente que circula na carga em um nível de tensão diretamente proporcional. O TC utilizado no protótipo, ilustrado na Figura 2, tem a capacidade de medir até 30 A, mas

é possível a utilização de TCs com capacidade maior, desde que o nível de tensão recebido na porta analógica 1 do Arduino não ultrapasse 20 V (ARDUINO DUEMILANOVE, 2010).



Figura 2 - Sensor transformador de corrente (NON-INVASIVE AC CURRENT...,2010)

O circuito medidor de corrente está ilustrado na Figura 3. O nível de tensão de saída do TC recebe um sinal de *offset*, fornecido pelo divisor de tensão formado por R5 e R6. O capacitor C2 é utilizado para reduzir o nível de ruído que eventualmente possa existir no sinal de entrada.

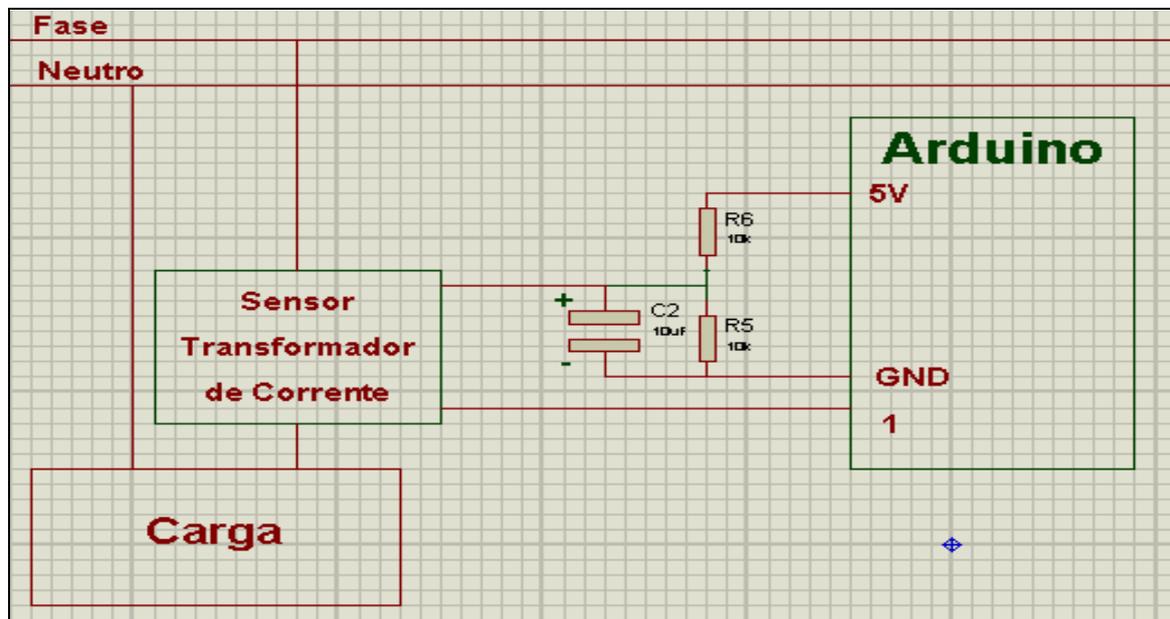


Figura 3 – Circuito medidor de corrente

2.3 Arduino

O Arduino é uma plataforma de *hardware* livre, projetada com um microcontrolador que pode ser programado em linguagem C. Possui uma rica biblioteca de exemplos de programas com funcionalidades de placa, disponíveis para *download* online (ARDUINO, 2010a).

As portas analógicas da plataforma de *hardware* Arduino são configuradas para aquisição de leituras instantâneas dos valores de tensão presentes nas mesmas. O processamento executado na placa Arduino é feito pelo microcontrolador Atmega328P, da Atmel. É um microcontrolador de alto desempenho, baixo consumo, com corrente demandada em seu estado ativo de aproximadamente de 0,2 mA, e no estado não-ativo de 0,1 μ A. Possui 1KB de memória EEPROM, 2KB de SRAM, seis canais PWM, oito canais digitais e seis canais analógicos; sua tensão de operação é de 1.8 à 5.5volts e o *clock* pode ser de 0 à 20MHz (MICROCONTROLLER..., 2009). O microcontrolador em encapsulamento isolado está ilustrado na Figura 4. A tabela 1 sintetiza sua pinagem em relação à a alimentação, entradas e

saídas e funcionalidades; essas informações são de grande relevância durante o processo de aprendizagem sobre aquisição e processamento dos sinais da medição inteligente de energia.

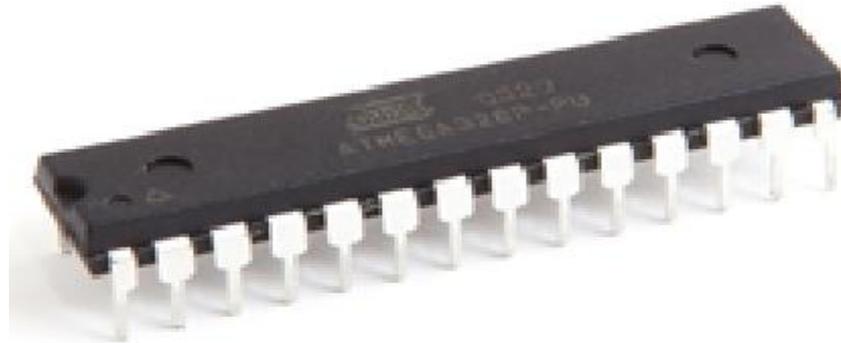


Figura 4 – Microcontrolador Atmega328P (ATMEGA328...,2010)

Tabela 1 - Relação de pinos entre o microcontrolador Atmega328P (MICROCONTROLLER..., 2009)

Pino	Função no Arduino	Pino	Função no Arduino
1 – PC6	Reset	15 – PB1	Porta digital 9 (PWM)
2 – PD0	Porta digital 0 (RX)	16 – PB2	Porta digital 10 (PWM)
3 – PD1	Porta digital 1 (TX)	17 – PB3	Porta digital 11 (PWM)
4 – PD2	Porta digital 2	18 – PB4	Porta digital 12
5 – PD3	Porta digital 3 (PWM)	19 – PB5	Porta digital 13
6 – PD4	Porta digital 4	20 – A VCC	Alimentação
7 – VCC	Alimentação	21 – AREF	Porta de referência
8 – GND	Terra	22 – GND	Terra
9 – PB6	Crystal	23 – PC0	Porta analógico 0
10 – PB7	Crystal	24 – PC1	Porta analógico 1
11 – PD5	Porta digital 5 (PWM)	25 – PC2	Porta analógico 2
12 – PD6	Porta digital 6 (PWM)	26 – PC3	Porta analógico 3
13 – PD7	Porta digital 7	27 – PC4	Porta analógico 4
14 – PB0	Porta digital 8	28 – PC5	Porta analógico 5

A plataforma Arduino, ilustrada na Figura 5, incorpora o microcontrolador ao hardware periférico necessário que permite explorar em uma placa única as funcionalidades desejadas. Essa plataforma possui as portas de entrada e saída já condicionadas, conector para alimentação de componentes, conector de alimentação e conector para comunicação serial, para se comunicar com um microcomputador pessoal externo à plataforma. Essa abordagem permite que estudantes nos níveis iniciais de cursos de engenharia possam interagir com hardware embarcado e com interfaceamento de sinais de E/S facilmente, de maneira praticamente instrumental, favorecendo a aquisição de conhecimento sobre o assunto que pode ser aprofundado de forma prática, segundo uma abordagem “hands-on”.

3 EXTRAÇÃO DE DADOS

A plataforma Arduino possui um compilador disponível online (ARDUINO, 2011), conforme ilustrado na Figura 6. Nesse compilador, foi desenvolvido um programa em

linguagem C, agregando trechos de código específicos para acesso a funcionalidades particulares do microcontrolador.

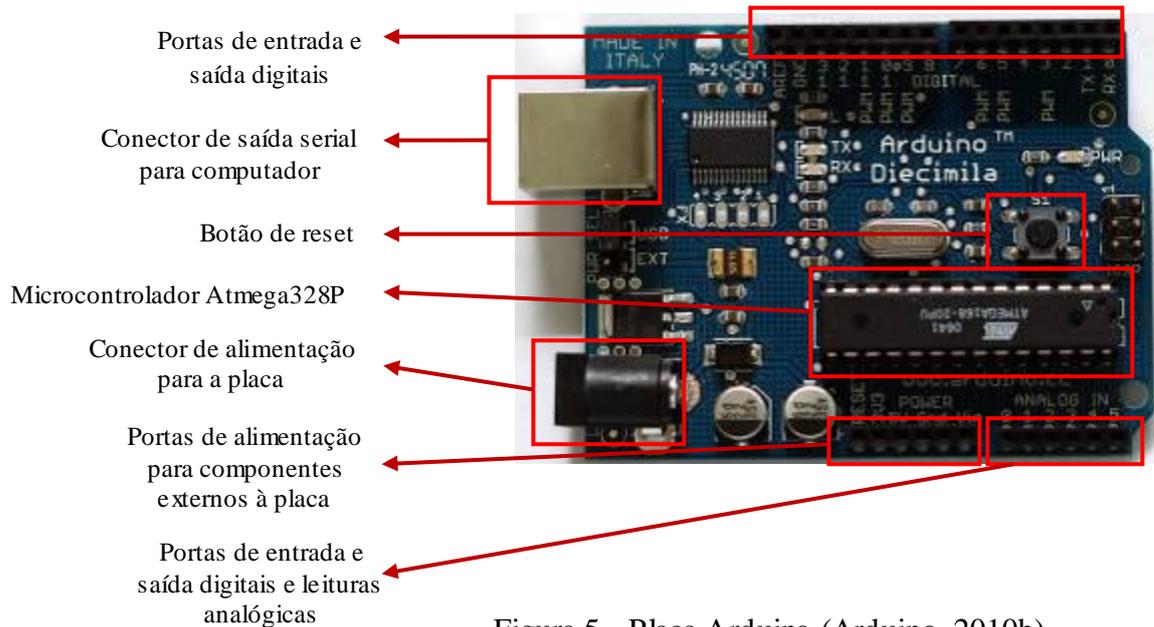


Figura 5 - Placa Arduino (Arduino, 2010b)

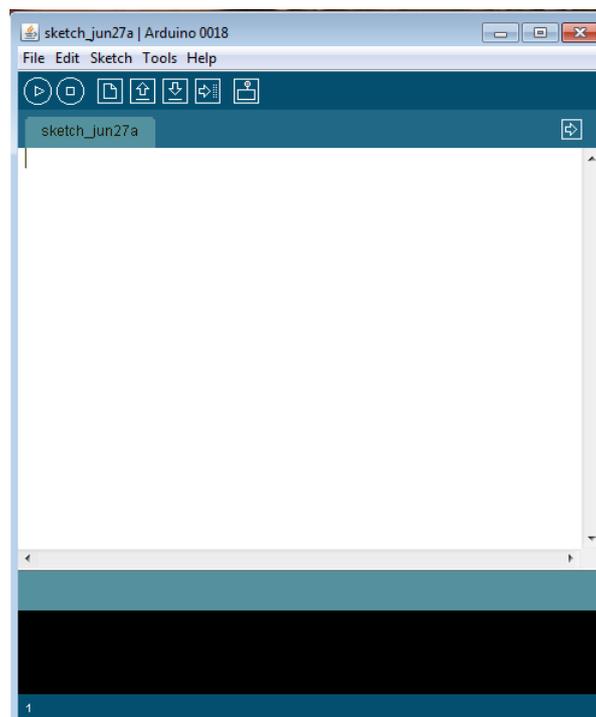


Figura 6 – Compilador da plataforma Arduino

O programa desenvolvido neste trabalho realiza simultaneamente a extração dos valores de tensão e corrente, através dos sinais presentes nas portas 1 e 2 do Arduino, enviando os valores amostrados para o compilador. O compilador foi configurado para realizar a exibição e acúmulo dos valores enviados pelo Arduino para o microcomputador através de sua porta USB, empregando protocolos específicos de comunicação serial.

O principal objetivo da etapa de extração de dados é adquirir o maior número de valores instantâneos de tensão e corrente, em um determinado intervalo de tempo, para que seja possível visualizar o comportamento das curvas dessas variáveis de uma maneira que seja o mais próxima possível do comportamento real da rede elétrica. Assim, será possível analisar em tempo quase real o impacto que uma carga de interesse apresenta na rede elétrica quando conectada aos condutores de alimentação.

Especificamente em relação ao processo de amostragem, é importante destacar que o microcontrolador Atmega328P possui conversores analógicos digitais (ADC) com 10 bits de resolução, que demandam 25 ciclos de *clock* na primeira conversão e 13 nas posteriores. O *clock* de operação da plataforma Arduino é de 16 MHz. Porém, no ADC, essa frequência possui um fator específico de divisão, denominado *prescaler*, inicialmente estabelecido com valor igual a 2. O *prescaler*, no entanto, pode ser configurado em valores iguais a 4, 8, 16, 32, 64 e 128. Com o valor padrão para o *prescaler*, na conversão analógico-digital, o *clock* se torna igual a 8 MHz. Desta maneira, a taxa de amostragem na conversão analógico-digital pode ser definida em um valor representado em 10 bits para cada amostra, o que corresponde a 6.153.840 bits por segundo, conforme a Equação 1 (SANTOS, 2009).

$$\frac{8 \times 10^6}{13} \approx 615.384 \text{ amostras por segundo} \quad (1)$$

4 RESULTADOS

Na implementação descrita neste trabalho, foi utilizada comunicação serial para a interface de envio de dados ao computador externo. Esse tipo de interfaceamento limita o fluxo total em 115.200 bits por segundo, que é o *baud rate* máximo que a plataforma suporta. Torna-se importante salientar que essa limitação faz com que nem todos os valores amostrados pelo Arduino possam ser enviados para o computador. No entanto, como os sinais de tensão e corrente adquiridos se referem a sinais senoidais com frequência fundamental em torno de 60 Hz, a taxa de amostragem se mostrou suficiente para propósitos didáticos e de demonstração.

Para fins de validação do funcionamento do medidor, foram feitas medições em um circuito de baixa tensão monofásico, de 127 V e 60 hertz, alimentando uma lâmpada de 60 watts, que viabilizam a obtenção das curvas de tensão e corrente. A visualização dos dados recebidos na porta USB é obtida através do próprio compilador do Arduino (já apresentado na Figura 6). Os valores adquiridos foram exportados para uma planilha de dados, de onde foram gerados gráficos para melhor visualização. A Figura 7 apresenta o gráfico resultante das amostras de tensão coletadas na porta 2 do Arduino.

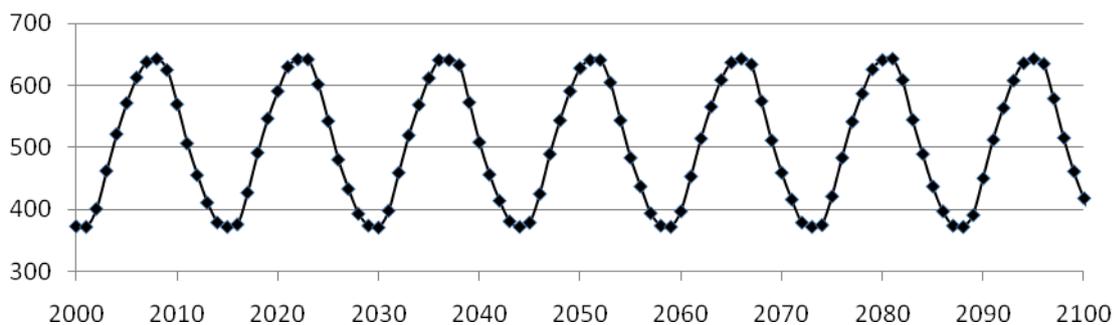


Figura 7: Gráfico 1 – Curva com amostras de tensão

A Figura 8 apresenta o gráfico resultante das amostras de corrente, coletadas na porta 1 do Arduino.

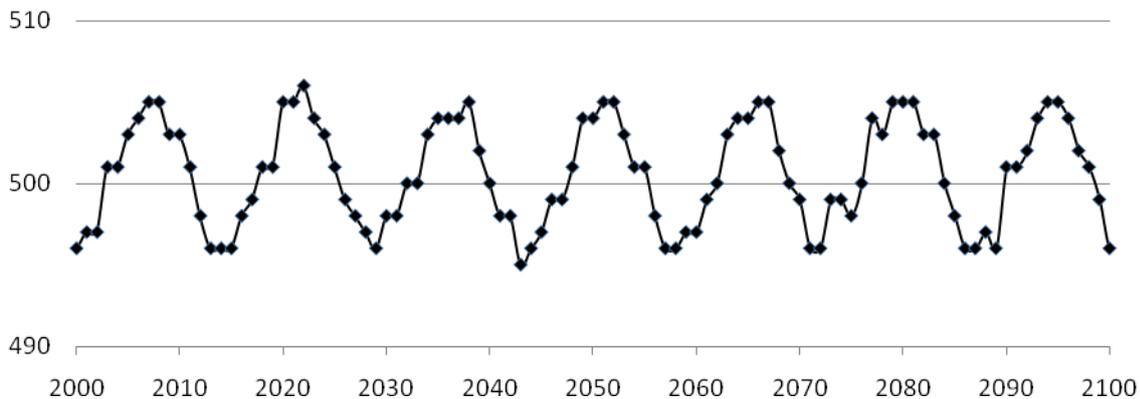


Figura 8: Curva com amostras de corrente

A Figura 9 apresenta as curvas dos valores das amostras de tensão e corrente, sobrepostas no mesmo gráfico, que permite o cálculo da potência elétrica instantânea e as decorrentes estimativas de energia total consumida, fator de potência e comportamento da carga.

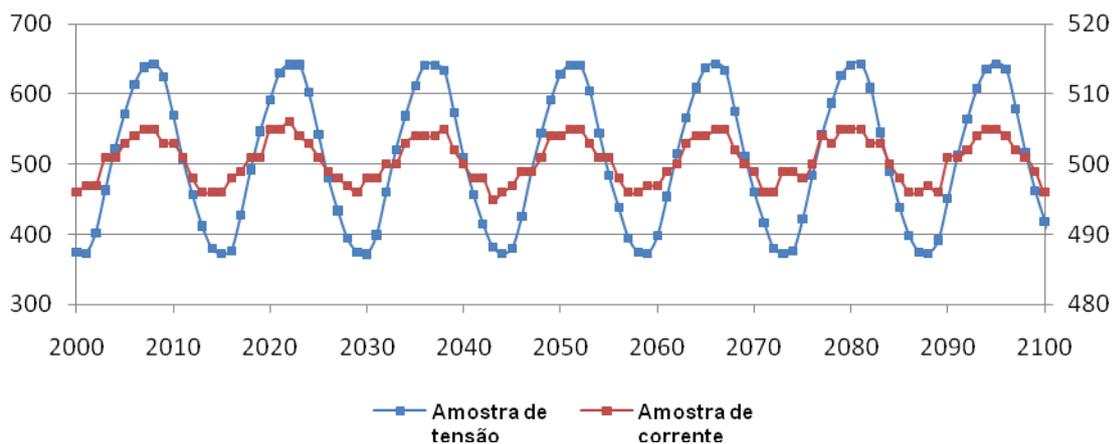


Figura 9: Sobreposição de curvas com amostras de tensão e corrente

Os gráficos apresentados nas Figuras 7, 8 e 9 apresentam amostras feitas no mesmo intervalo de tempo, onde os eixos x de cada gráfico estão entre as amostras de número 2000 e 2100, permitindo uma visualização adequada do comportamento das curvas. O processo de amostragem, conjugado ao tempo computacional requerido pelo software embarcado, permite adquirir cerca de 850 amostras por segundo, o que comporta cerca de 7 ciclos de corrente/tensão em 100 amostras para uma frequência nominal de 60 Hz.

Nesses gráficos, o eixo y não apresenta os valores reais das grandezas envolvidas, mas sim os valores crus digitalizados de amostragem obtidas diretamente dos sensores, que se referem a uma tensão de aproximadamente 127 volts e uma corrente em torno de 470 miliampéres. A proporcionalidade entre os valores amostrados e os reais, porém, é mantida. Essa diferença entre os valores pode ser tratada com técnicas de condicionamento do sinal, levando em conta a eletrônica envolvida no aquisitor de dados. Tal abordagem (manutenção de amostras e valores crus de leitura) torna-se didaticamente interessante no sentido em que leva o aluno a refletir sobre todas as etapas envolvidas no sensoriamento e aquisição de informações, através de uma interface conjugada hardware-software.

As deformações na forma de onda de corrente também permitem explorar conceitos de interferência das demais cargas na rede, uma vez que o sistema interligado, principalmente na baixa tensão, tem limitações na absorção dos impactos não lineares dos diferentes pontos de consumo e não pode ser tomado, em contraposição aos conceitos apresentados na teoria de sistemas de energia elétrica, como um barramento infinito. Assim, é possível ao estudante de graduação verificar que, mesmo em um ponto que alimenta uma carga linear (como uma lâmpada incandescente) podem ocorrer algumas discrepâncias entre as formas de onda de tensão e corrente em função das características dos condutores, de operação da rede, da atuação da proteção e do balanceamento entre fases da instalação elétrica.

Em relação à plataforma Arduíno, os dados adquiridos podem ser disponibilizados em planilhas, temporalmente sincronizadas, o que possibilita explorar conceitos como diferença de fase entre tensão e corrente, fator de potência, energia e dimensionamento de condutores, qualidade da energia e modelos de carga, dentre outros.

5 CONCLUSÃO

As extrações dos valores de tensão e corrente possibilitam a obtenção de curvas que oferecem formatos aproximadamente senoidais, com algumas deformidades, sendo mais acentuadas na curva de corrente, onde denotam a presença de outras cargas não-lineares instaladas na mesma rede.

Mesmo com a interferência de cargas não-lineares na rede, o aquisitor de dados se apresentou confiável, com curvas de tensão e corrente em fase, como esperado, por se tratar de uma carga puramente resistiva.

A simplicidade de implementação do medidor apresentado neste trabalho torna possível o estudo, com propósitos didáticos, para cursos de graduação em engenharia, de medição elétrica em redes inteligentes, em uma plataforma de hardware bastante acessível e de baixo custo, associada a um ambiente de desenvolvimento de software livre e gratuito, com uma linguagem de programação bastante similar à Linguagem C. Mais ainda, é possível a exportação de dados e apresentação das curvas da carga que se deseja analisar, o que favorece uma vivência prática do comportamento dinâmico de cargas elétricas na rede de distribuição de energia, possibilitando a exploração didática, em bancada, de tópicos relacionados especialmente às instalações elétricas (tensão, corrente, potência, energia, triângulo de potências, fator de potência, etc.) e também à redes inteligentes (“*smart-grids*”) através da conceituação de medição inteligente de energia.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CPQD. **Seminário internacional discute Smart Grid com setor de energia elétrica**, Fatos 161, Mai/Jun de 2009 - Ano 12. Disponível em: <<http://www.cpqd.com.br/imprensa-e-eventos/fatos/189-fatos-161/2442-seminario-internacional-discute-smart-grid-com-setor-de-energia-eletrica.html>> Acesso em 27 jun. 2011.

ARDUINO. 2010a. Disponível em: <<http://arduino.cc/>>. Acesso em: 20 out. 2010.

ARDUINO. Faça download do software Arduino. 2011. Disponível em: <<http://arduino.cc/en/Main/Software>>. Acesso em 26 jun. 2011.

ARDUINO DUEMILANOVE. **Arduino**, 2010. Disponível em: <<http://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardDuemilanove>>. Acesso em: 22 out. 2010.

ATMEGA328 28 pin DIP with Bootloader. **Spikenzielabs**, 2010. Available from: <http://www.spikenzielabs.com/Catalog/index.php?main_page=product_info&products_id=127&zenid=0138fe9a20ca80423c95d68312241e68>. Cited: 08 out. 2010.

MICROCONTROLLER with 4/8/16/32k bytes in-system programmable flash. Atmel 8161D-AVR, out. 2009. Available from: <http://www.atmel.com/dyn/resources/prod_documents/doc8161.pdf - datasheet Atmega 328>. Cited: 2010.

NON-INVASIVE AC current sensor (30A max). **Speed depot**, 2010. Available from: <http://www.seeedstudio.com/depot/noninvasive-ac-current-sensor-30a-max-p-519.html?cPath=84_91>. Cited: 09 out. 2010.

SANTOS, N. P.. **Arduino**: introdução e recursos avançados. 2009. 69f. Pós graduação (Engenharia Naval) – Departamento de Engenheiros Navais, ramo de Armas e Electrónica, Universidade de Nova Lisboa, Lisboa. Disponível em: <http://www.isegi.unl.pt/docentes/vlobo/escola_naval/MFC/Tutorial%20Arduino.pdf>. Acesso em: 10 out. 2010.

FREE HARDWARE BASED ELECTRICITY METERING FOR SMART GRID BEHAVIOR STUDIES

Abstract: *This work provides instructions about assembling and using an intelligent power meter capable of acquiring data from loads installed on smart grids. The main interest on the usage of this meter is to present and analyze the behavior of intelligent networks for didactical purposes, based on a free hardware approach, by taking simultaneous samples of voltage and current levels of electrical loads. The resulting prototype presents accuracy and simplicity adequate for teaching electric power metering on a experimental basis.*

Key-words: *Smart Grids, Intelligent Electricity Meters, Data Acquisition, Load Models, Free Hardware.*