

**INTEGRANDO ESCOLA E EMPRESA ATRAVÉS DO TCC:
MEDIDOR ELETRÔNICO DE ENERGIA DE BAIXO CUSTO
COMPATÍVEL COM A NORMA NBR 14522**

Rafael L da Silva – rafael@nersd.org

Centro Federal de Educação Tecnológica de Santa Catarina, NERsD

Avenida Mauro Ramos, 950

88020-300 – Florianópolis – SC

Roberto A Dias, Dr – roberto@cefetsc.edu.br

Clóvis A Petry, Dr – petry@cefetsc.edu.br

Centro Federal de Educação Tecnológica de Santa Catarina, Depto. Acadêmico de Eletrônica

Marco A Giancesini – marcoag@celesc.com.br

CELESC Distribuição S/A

Avenida Itamarati, 160

88034-900 – Florianópolis – SC

Luiz F V Teixeira – luiz@w2b.com.br

W2B Comunicações LTDA

Rua Tenente Silveira, 293

88.000-000 – Florianópolis – SC

***Resumo:** O presente artigo mostra a integração entre escola e empresas através do desenvolvimento de um trabalho de conclusão do Curso Superior de Tecnologia em Sistemas Digitais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Santa Catarina (CEFET-SC). O objetivo do trabalho de conclusão de curso foi a implementação de um medidor eletrônico de energia elétrica, monofásico, com interface de comunicação compatível com a norma brasileira NBR14522. O desenvolvimento deste tornou-se possível através de uma parceria entre um grupo de pesquisa do CEFET-SC, o Núcleo de Engenharia de Redes e Sistemas Distribuídos (NERsD), a concessionária de distribuição de energia elétrica - Centrais Elétricas de Santa Catarina (CELESC) e a empresa privada W2B Comunicações Ltda. Neste trabalho foram apresentadas as bases tecnológicas que sustentam o desenvolvimento do medidor eletrônico de energia elétrica, os impactos previstos nos procedimentos operacionais da concessionária de distribuição de energia elétrica, enfatizando-se uma solução de baixo custo e compatível com uma norma nacional de intercâmbio de informações entre medidores eletrônicos e sistemas de aquisição de dados.*

***Palavras-chave:** Microcontroladores, Medição de energia elétrica, MSP430, Trabalho de Conclusão de Curso.*

1 INTRODUÇÃO

O contexto da educação profissional e tecnológica no Brasil vem se alterando, principalmente com a popularização dos cursos superiores de tecnologia, que são cursos focados nas necessidades regionais e ligados diretamente ao mercado de trabalho, visando o atendimento das necessidades deste, sua atualização tecnológica, identificação de novos nichos de mercado e reorientação de seu currículo de acordo com as necessidades (BRASIL, 2007).

Sendo os cursos superiores de tecnologia, cursos de graduação, estes devem ter o tempo adequado para a formação profissional, não sendo uma graduação “curta”, e sim uma forma diferenciada de formação superior, com ênfase nas competências exigidas pelo mercado de trabalho (CEFETPR, 2007).

A eletrônica digital vem sendo utilizada cada vez mais como base dos produtos, criando assim novas possibilidades de aplicações e soluções. Nestas possibilidades está a atuação do Tecnólogo em Sistemas Digitais, que tem na aplicação dos processadores digitais, seu foco principal. Onde por processadores digitais, entendem-se os dispositivos lógicos programáveis (PLD), microcontroladores, microprocessadores e processadores digitais de sinal (DSP).

A estrutura curricular do Curso Superior de Tecnologia em Sistemas Digitais está baseada nas tecnologias disponíveis no mercado, como por exemplo: Dispositivos Lógicos Programáveis, sistemas elaborados a partir de Microprocessadores, Microcontroladores, Processadores Digitais de Sinais, além da base conceitual e prática de lógica discreta, estruturas amplificadoras e acionamentos eletroeletrônicos. A formação do Tecnólogo em Sistemas Digitais não se restringe à área tecnológica, passa também pela gestão tanto do conhecimento e recursos humanos e ainda pela gestão empreendedora. Desta forma o perfil do egresso está diretamente ligado ao desenvolvimento de produtos eletrônicos, na forma de concepção, elaboração, teste e depuração de sistemas digitais baseados em eletrônica; aplicação na forma de interpretação e aplicação de conhecimentos para a manutenção do funcionamento destes sistemas e empreendimento, na percepção e interpretação de oportunidades para a aplicação de produtos ou serviços baseados em sistemas digitais.

Ao final do curso, como requisito para a obtenção do grau de Tecnólogo de Sistemas Digitais é realizado o Trabalho de Conclusão de Curso, que objetiva agregar os vários conhecimentos desenvolvidos durante os módulos do curso, integrando habilidades e competências desenvolvidas, através de um trabalho de cunho tecnológico.

Dentro deste contexto de aplicação da tecnologia, o tripé: ensino, pesquisa e extensão, o presente trabalho foi desenvolvido. O fruto deste trabalho resultou no desenvolvimento de um protótipo, como resultado de um trabalho de conclusão do Curso Superior de Tecnologia em Sistemas Digitais. A concepção original do trabalho surgiu a partir de um seminário, durante o eixo temático de sistemas microcontrolados, onde foi apresentado o microcontrolador fabricado pela empresa americana Texas Instruments, modelo MSP430, sendo com este possível realizar a medição de energia elétrica. Estas discussões foram então trazidas ao NERsD (Núcleo de Engenharia de Redes e Sistemas Distribuídos), grupo de pesquisa vinculado ao CEFET/SC, que possui alguns projetos na área e em especial o projeto GLD Infra que vem de encontro ao foco do trabalho de conclusão de curso. O GLD Infra tem por objetivo a implementação de uma infra-estrutura de comunicações utilizando a tecnologia PLC (Power Line Communications), sendo a medição dos parâmetros de consumo final de energia realizada por um medidor eletrônico. Este projeto faz parte do ciclo de P&D 2005/2006 da ANEEL/CELESC em parceria com a empresa W2B Comunicações LTDA. Estas razões levaram a incorporação do trabalho de conclusão de curso ao projeto GLD Infra e seu desenvolvimento vinculado à parceria com a CELESC e W2B.

Na realização do protótipo, o principal dispositivo é o microcontrolador, pois é ele o responsável pela tarefa da medição das grandezas elétricas e processamento das informações de consumo de energia elétrica e outros parâmetros. Também se faz uso dos fundamentos de eletrônica analógica e digital, bem como a programação em linguagem C para microcontroladores.

Logo, este trabalho visou a implementação de um protótipo de medidor eletrônico de energia elétrica, baseado no microcontrolador fabricado pela empresa americana *Texas Instruments*, modelo MSP430FE427. No protótipo implementou-se uma interface de comunicação serial compatível com a NBR 14522.

Na seção 2 é apresentada a revisão bibliográfica sobre microcontroladores, medição de energia elétrica, fator de deslocamento e as normas NBR 14519 e NBR 14522. Na seção 3 apresenta-se em linhas gerais a família de microcontroladores MSP430. Na seção 4 tem-se a apresentação do problema e a solução apresentada, seguida da descrição do *hardware* proposto, o *software* necessário e a calibração para o protótipo do medidor eletrônico. Na seção 5 apresentam-se os resultados obtidos e a seção 6 finaliza o trabalho com as conclusões e propostas para a evolução do trabalho.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Microcontroladores

Os microcontroladores vem se tornando presença constante nas aplicações residenciais, comerciais e industriais. A popularização do uso destes dispositivos neste século tem ganhado evidência pela miniaturização dos produtos eletrônicos (USATEGUI & MARTÍNEZ, 1999).

O principal aspecto que difere os microcontroladores dos microprocessadores, é a sua funcionalidade. Para que um microprocessador possa ser utilizado, outros componentes devem ser adicionados, tais como memória, *chipssets* e componentes para receber e enviar dados. Por outro lado, o microcontrolador foi projetado para possuir todas estas funcionalidades em uma única pastilha.

Para (USATEGUI & MARTÍNEZ, 1999), os produtos que incorporam um microcontrolador dispõem de uma série de vantagens, como:

- Aumento dos benefícios: um maior controle em um determinado elemento representa uma melhoria considerável de sua performance;
- Aumento da confiabilidade: a substituição de um número elevado de componentes por um microcontrolador diminui o risco de falhas e necessita de menos ajustes no circuito;
- Redução do tamanho no produto: A integração do microcontrolador em uma placa diminui o volume, o trabalho manual e o estoque de componentes;
- Maior flexibilidade: as características do controle dependem da programação porque sua modificação necessita somente mudanças no programa (*firmware*) residente no dispositivo.

Os microcontroladores dispõem de uma série de periféricos incorporados, que desempenham funções fundamentais no seu funcionamento. Sendo estes periféricos responsáveis por controlar as operações de entrada e saída de dados, realizar contagem de tempo e eventos externos, realizar interfaces analógico/digitais ou digitais/analógicas, efetuar a comunicação de dados do microcontrolador com outros microcontroladores ou dispositivos envolvidos no processo, entre outras funções.

2.2 Medição de energia elétrica

A medição de energia elétrica é um dos principais processos no desenvolvimento dos serviços de fornecimento e comercialização de energia elétrica (ITO, 2003).

Na realização da medição, os medidores de energia elétrica exercem papel fundamental no processo, sendo o medidor eletromecânico mais comumente utilizado devido a sua robustez e baixo custo, por isso representa 90 a 95% do mercado. O medidor eletrônico que atualmente representa uma pequena fatia deste mercado, vem ganhando espaço pelo fato que a atualização tecnológica dos medidores eletromecânicos não compensar os custos envolvidos (MIRANDA, 1987).

Por diversas funcionalidades agregadas à medição eletrônica de energia elétrica como medição multi-parâmetros, envolvendo não apenas a energia elétrica consumida, mas as potências instantâneas consumidas pela instalação, tensão, corrente, fator de deslocamento ($\cos \varphi$), frequência, entre outros parâmetros, o processo de medição pode ser otimizado. Podem ainda ser agregados ao medidor módulos de venda de energia na forma de créditos pré-pagos, sistemas de medição automática, os chamados sistemas AMR (*Automatic Meter Reading*), que permitem a medição e comunicação destes dados diretamente do medidor com a concessionária, possibilitando a detecção de fraudes, popularmente conhecidos como “gatos” e atuação sobre estas irregularidades na forma de desligamento remoto.

O conceito de medição eletrônica de energia elétrica é relativamente simples e pode ser explicado de acordo com a “Equação 1”, como a integração num dado intervalo de tempo (Δt) da multiplicação entre os valores amostrados de tensão (V) e corrente (I) medidos.

$$E = \int_{t=0}^{t=\infty} V \cdot I \cdot \Delta t \quad [\text{kWh}] \quad (1)$$

Para o MSP430, esta medição é realizada em interfaces analógicas separadas, sendo uma para medição de tensão que pode ser realizada utilizando-se transformadores de potencial ou divisor resistivo e uma outra interface para corrente, que pode utilizar transformadores de corrente, resistor shunt ou sensor de efeito Hall (SILVA, 2007).

O princípio de medição apresentado por (BIERL, 2000) através da “Equação 2” consiste em realizar a amostragem dos sinais de tensão e corrente em intervalos regulares de tempo e multiplicar estas amostras, obtendo-se assim o valor da potência instantânea. O somatório dessas multiplicações, num intervalo de tempo estabelecido, fornece o valor da energia elétrica consumida neste intervalo de tempo.

$$E = \sum_{t=0}^{t=\infty} i_n \cdot (u_{n-1} + u_{n+1}) \cdot \Delta t \quad [\text{kWh}] \quad (2)$$

Onde: i_n é a amostra de corrente elétrica e u_n é a amostra do valor da tensão da rede.

2.3 Fator de potência x fator de deslocamento

De acordo com a portaria 1.569 de 23/12/93 (ANEEL, 2000) do Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica (DNAEE), o fator de potência mínimo exigido para as concessionárias de energia elétrica é de 0,92 (a partir de março/96).

Porém, a designação de fator de potência considera que as cargas dos circuitos medidos são lineares. Caso isso não seja verdadeiro, o que será medido e controlado é o fator de deslocamento (NOLL et al., 2005).

Quando as cargas eram somente capacitivas, indutivas e resistivas o fator de potência era definido como o co-seno do ângulo de defasagem entre a tensão e a corrente. Este ângulo é medido levando-se em conta que o período da tensão para uma rede de 60Hz, pouco mais de 16ms, que corresponde a 360 graus.

A diferença é que o fator de deslocamento é dado pela defasagem do ângulo medido entre a componente fundamental da tensão e a componente fundamental da corrente, desprezando-se todo o conteúdo harmônico destes sinais.

Para o cálculo do fator de potência é necessário um sistema com alta capacidade de processamento, pois a aquisição dos dados de tensão e corrente para a medida do deslocamento entre as senóides deve ser feita para o sinal fundamental e suas harmônicas e executado um somatório destes deslocamentos para se obter o valor real do fator de potência. Para que isto seja feito em tempo real, um sistema baseado em um processador digital de sinal (DSP) recebe a amostra de um sinal, faz seu processamento, e coloca na saída o dado antes que a próxima amostra seja adquirida (SILVA, 2007).

Como a maioria dos sistemas de medição eletrônica de energia elétrica digital utiliza como base microcontroladores que possuem capacidade de processamento reduzida em relação aos DSP's, estes executam apenas o cálculo do fator de deslocamento, pois realizam apenas a aquisição das componentes fundamentais da tensão e corrente.

2.4 Transdutores para medição de tensão

Para a medição de tensão, o fabricante do microcontrolador faz recomendação de uso dos métodos descritos a seguir.

O transformador de potencial ou TP, é um transformador para instrumentação cujo enrolamento primário é ligado em derivação com um circuito elétrico e cujo enrolamento secundário se destina a alimentar bobinas de potencial de instrumentos elétricos de medição, controle ou proteção. Na prática é considerado um redutor de tensão, pois a tensão no seu circuito secundário é normalmente menor que a tensão no seu enrolamento primário (FILHO, 1997).

O divisor de tensão é uma associação de resistores para que a tensão aplicada à entrada deste circuito seja dividida entre seus componentes resultando na saída do mesmo em uma tensão nos níveis adequados à entrada do circuito de medição.

2.5 Transdutores para medição de corrente

Conforme mencionado anteriormente, a medição de corrente elétrica poderá ser realizada com a utilização de um dos métodos explanados a seguir.

Um transformador de corrente ou simplesmente TC é um dispositivo que transforma a corrente que circula em um enrolamento primário, através de um acoplamento magnético, em uma corrente induzida no secundário. Têm a função de fornecer correntes proporcionais às medidas no circuito primário de potência, mas suficientemente reduzidas e isoladas galvânicamente de forma a possibilitar a medição por equipamentos de proteção e medição.

A bobina de *Rogowski* consiste de um núcleo toroidal, que é colocado em torno do condutor. O campo magnético produzido pela corrente alternada no condutor induz uma tensão na bobina, proporcional a intensidade desta corrente.

Um dos processos mais utilizados de medida de corrente elétrica em um circuito é feito introduzindo-se uma resistência *shunt* em série com o circuito. A intensidade de corrente é obtida pela lei de *Ohm* a partir da tensão medida na resistência *shunt*, e esta tensão proporcional à corrente elétrica é aplicada ao circuito de medição.

Um sensor de efeito *Hall* é basicamente uma pastilha retangular de material condutor conduzindo corrente, posicionado em uma região de campo magnético para medir a densidade de fluxo, como ilustrado na “Figura 1”.

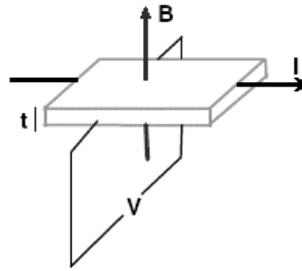


Figura 1 – Representação do sensor de efeito Hall.

Se há uma densidade de fluxo magnético de magnitude B ortogonal à superfície de uma pastilha de espessura t , uma diferença de potencial V é induzida ao longo de sua largura, dada pela “Equação (3)”:

$$V = \frac{Rh \cdot I \cdot B}{t} \quad (3)$$

Onde Rh é o coeficiente *Hall*, o qual é constante para um dado material a uma temperatura fixa, sendo expresso em $m^3/^\circ C$. Portanto, para uma determinada corrente I e temperatura de operação t , a tensão V é proporcional a densidade de fluxo magnético B .

2.6 Normas NBR 14519 e NBR 14522

A NBR14519 (ABNT, 2000a) estabelece as condições mínimas exigíveis e aplicáveis a medidores eletrônicos, monofásicos e polifásicos, de índice de classe 0,2 - 0,5 - 1,0 e 2,0 para a medição de energia elétrica em corrente alternada.

Através desta norma estão regulamentadas uma série de definições quanto ao medidor, seus elementos funcionais, partes e grandezas do mesmo, erros, termos usados nos ensaios, grandezas de influência, ensaios e termos relacionados com o registro de grandezas.

Também estão definidas através da norma as classificações destes medidores em grupos e modelos, suas características construtivas mecânicas e elétricas, especificações de comunicação, identificação, quanto aos registradores, formas de exibição dos dados medidos e a forma com que os ensaios devem ser realizados.

A NBR14522 (ABNT, 2000b) define o padrão de intercâmbio de informações no sistema de medição de energia elétrica, de forma a se alcançar à compatibilidade entre os sistemas e equipamentos de medição de energia elétrica de diferentes procedências.

Com a existência de diversos fabricantes de equipamentos de medição de energia elétrica e cada um deles adotando um padrão próprio de comunicação, se faz necessário que exista uma regulamentação para que estes equipamentos estabeleçam comunicação com o objetivo da leitura e envio dos parâmetros medidos.

3 MICROCONTROLADOR MSP430

O MSP430 é um microcontrolador de 16 bits da *Texas Instruments*. Possui arquitetura clássica *Von Neumann*, conjunto reduzido de instruções (RISC), tendo segundo (PEREIRA, 2005) como principais características:

- Baixo consumo: os MSP430 são dispositivos conhecidos pelo consumo incrivelmente baixo (da ordem de 0,1µA para retenção de dados na RAM, 0,8µA para funcionamento no modo de relógio de tempo real) e cerca de 250µA/MIPS em modo normal;
- Baixa tensão de operação: operam com tensões de 1,8V a 3,6V. Para programação da FLASH a maioria dos dispositivos opera com 2,7V;
- Conjunto de instruções ortogonais: disponibilidade de qualquer modo de endereçamento para qualquer instrução e qualquer operando permite que se escrevam códigos pequenos e eficientes;
- Número reduzido de instruções: conjunto composto de 27 instruções físicas (*opcodes*) e mais 24 instruções emuladas (variações das 27 instruções que utilizam os geradores de constantes), resultando em um conjunto de 51 instruções;
- Facilidade de gravação e depuração: possui interface JTAG para gravação e depuração, permitindo a programação e a depuração do *firmware* diretamente na placa de aplicação.
- Grande quantidade de periféricos: a família MSP430 conta com um grande número de periféricos internos, com ênfase especial para conversores A/D de até 16 bits, conversores D/A, comparador analógico, amplificador operacional programável, *timers* com diversos modos de funcionamento (incluindo PWM), controlador DMA, LCD, interface serial síncrona e assíncrona, multiplicador por *hardware* executando operações de multiplicação e acúmulo.

4 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA E SUA SOLUÇÃO

O problema a ser resolvido neste trabalho é a construção de um protótipo de baixo custo para medição de energia elétrica, sendo que este medidor possuirá interface serial para comunicação de dados nos padrões da norma NBR 14522 homologada pela ANEEL.

Neste trabalho a tecnologia principal a ser utilizada será dos microcontroladores e integrada ao *chip* utilizado um núcleo para processamento digital de sinais (DSP).

Fazendo-se um paralelo do protótipo proposto com as soluções ofertadas pelos principais fabricantes nacionais, tem-se com relação às grandezas medidas, uma similaridade, contando com o diferencial da medida de tensão, corrente e fator de deslocamento, parâmetros estes dificilmente encontrados em medidores monofásicos residenciais disponíveis comercialmente.

4.1 Arquitetura de *hardware*

O diagrama de blocos da “Figura 2” apresenta os principais componentes do sistema de medição proposto, baseando-se em (TI, 2005) onde estão ligados diretamente ao MSP430FE427, microcontrolador responsável pela medição de energia elétrica, o circuito de medição de tensão, sensor de corrente, interface serial e fonte de alimentação.

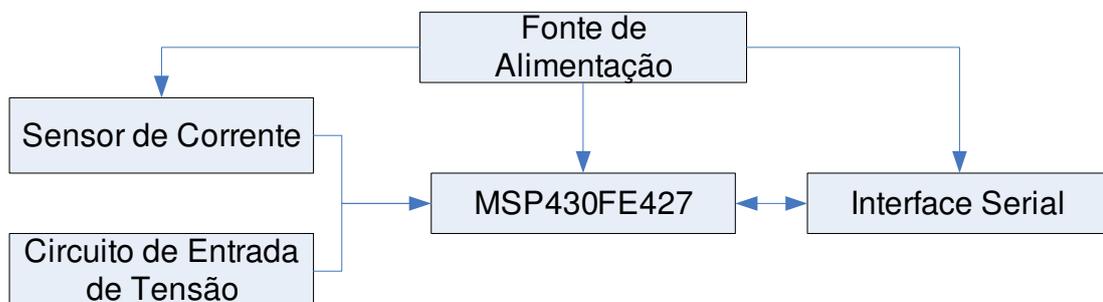


Figura 2 – Diagrama de blocos do medidor eletrônico.

MSP430FE427

O MSP430FE427, um microcontrolador com um processador de sinal embarcado, o ESP430CE1, especialmente desenvolvido para medição monofásica de energia, contendo três conversores A/D de 16 *bits* integrados ao *chip* com um canal dedicado para a entrada de tensão e dois canais para entrada de corrente elétrica.

Toda a tarefa de cálculo dos parâmetros de medição é efetuada pelo processador de sinal ESP430CE1 independente da CPU, o que deixa a CPU do microcontrolador livre para outras tarefas como aquisição de sinal, comunicação serial, operações de E/S, etc.

Dentre os parâmetros que podem ser medidos podemos destacar: energia consumida (kWh), potência ativa (kW), potência reativa (kVAr), potência aparente (kVA), tensão e corrente (RMS), fator de deslocamento ($\cos \phi$), frequência (Hz).

Medição de tensão e corrente

No protótipo proposto, o circuito da “Figura 3” consiste de um divisor de tensão resistivo que transforma os 220V da rede em aproximadamente 500mV, valor este adequado para entrada de sinal no canal de entrada de tensão do conversor A/D do microcontrolador.

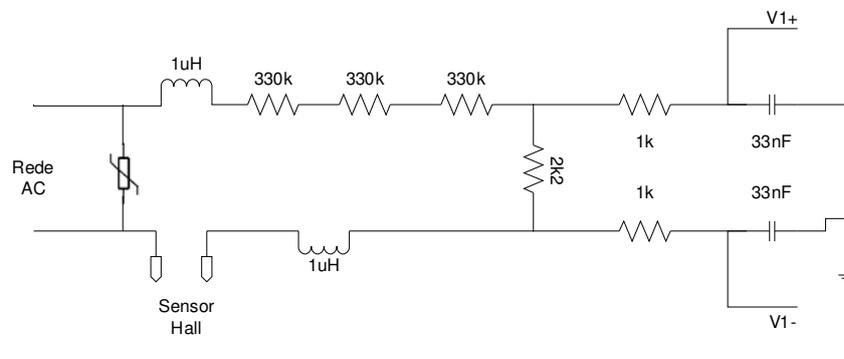


Figura 3 – Circuito de entrada de tensão.

Antes do divisor resistivo tem-se nos dois canais do conversor A/D um indutor atuando como filtro para bloqueio de ruídos de alta frequência existentes na rede, e após o divisor, utilizou-se a estratégia de filtro *anti aliasing* com o objetivo de evitar influências ao sinal de conversão. A proteção deste circuito é realizada com a colocação de um varistor de 275V na entrada da tensão da rede.

Como sensor de corrente utilizou-se um sensor de efeito Hall da *Allegro Microsystems* (MYCROSYSTEMS, 2005), que opera na faixa linear de entrada contínua ou alternada de -100A a +100A, com seu sinal de saída variando proporcionalmente à entrada entre 0Vdc a 5Vdc. A alimentação do sensor é feita em 5Vdc.

De acordo com (FERREIRA & RAMIREZ, 2003), o sensor de efeito Hall, possui vantagens, que agregadas ao projeto influenciam em seu resultado de forma positiva, em comparação com outros tipos de sensores como transformadores de potencial ou shunt resistivo tais como:

- Boa precisão e linearidade;
- Baixa taxa de variação com a temperatura;
- Rápido tempo de resposta.

O circuito de corrente da “Figura 4” apresenta a ligação do sensor de corrente ao circuito de medição. No circuito tem-se um indutor no canal I+ atuando como filtro para ruídos de alta frequência da rede e nos canais I+ e I- a colocação de filtros *anti aliasing*. A proteção do circuito de corrente é efetuada por um diodo supressor de transientes entre o sinal de saída do sensor e a referência.

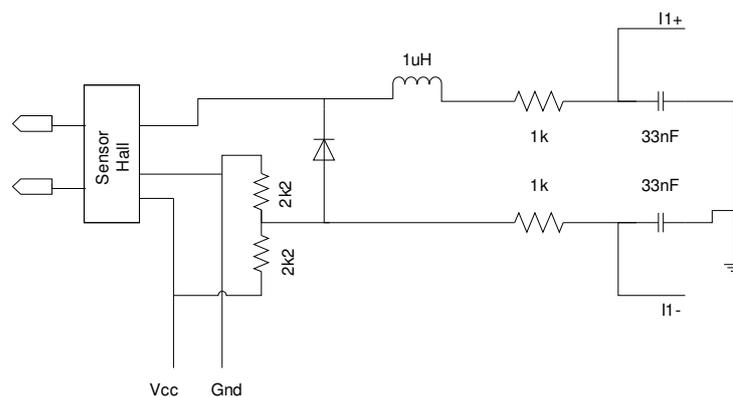


Figura 4 – Circuito de entrada de corrente.

Interface serial

A saída dos dados medidos é realizada através da interface serial assíncrona (UART) disponível no microcontrolador.

Como os dados medidos são apresentados via microcomputador é necessário adequar o sinal da interface serial ao padrão RS232, para isso utiliza-se o circuito integrado MAX232 (MAXIM, 2006), que converte os níveis TTL da interface serial do microcontrolador em RS232.

A comunicação tem por base o protocolo da norma NBR 14522, denominado interface serial de usuário, onde a cada intervalo de demanda correspondente a 15 minutos, é enviado um bloco de dados com os valores medidos através da interface serial do microcontrolador.

Incluiu-se também à definição do protocolo serial contido na norma, os dados de tensão, corrente e fator de deslocamento, medidos pelo MSP430FE427.

Fonte de Alimentação

Para alimentação do medidor foi utilizada uma fonte chaveada com entrada de 220Vac e saída de 5Vdc/1,5 A.

Esta fonte está ligada diretamente à rede elétrica a ser monitorada.

4.2 Arquitetura de software

Toda a programação do medidor eletrônico, assim como o *hardware*, com base em (TI, 2005) foi realizada em linguagem C, utilizando a IDE (*Integrated Development Environment - Ambiente Integrado de Desenvolvimento*) *IAR Embedded Workbench* para a família MSP430.

A estrutura básica de programação foi estruturada em quatro blocos principais:

- Programa principal: realiza a chamada das funções de inicialização do sistema de *clock*, interface de E/S, conversores A/D, módulo de medição ESP430CE1 e registradores de medição;
- Inicialização A/D: função que seleciona a fonte de *clock*, inicializa os registradores dos canais de medição e define o ganho dos amplificadores de cada canal;
- Módulo ESP430CE1: Inicializa constantes de medição na memória RAM, habilita módulo ESP e carrega registradores de calibração;
- Medição: Com as inicializações realizadas, o programa principal fica aguardando a interrupção do módulo ESP, onde nesta interrupção, quando o flag ENRDYFG é setado ocorre a atualização dos registradores de medição com os valores de energia ativa (Wh), energia reativa (VARh), tensão (V), corrente (I) e fator de deslocamento ($\cos \phi$).

Realizou-se também a implementação de uma interface em Visual Basic. Através desta interface visualizada na “Figura 5”, tem-se a indicação dos valores medidos de cada grandeza e ainda a opção de criação de um arquivo com o histórico das medidas.

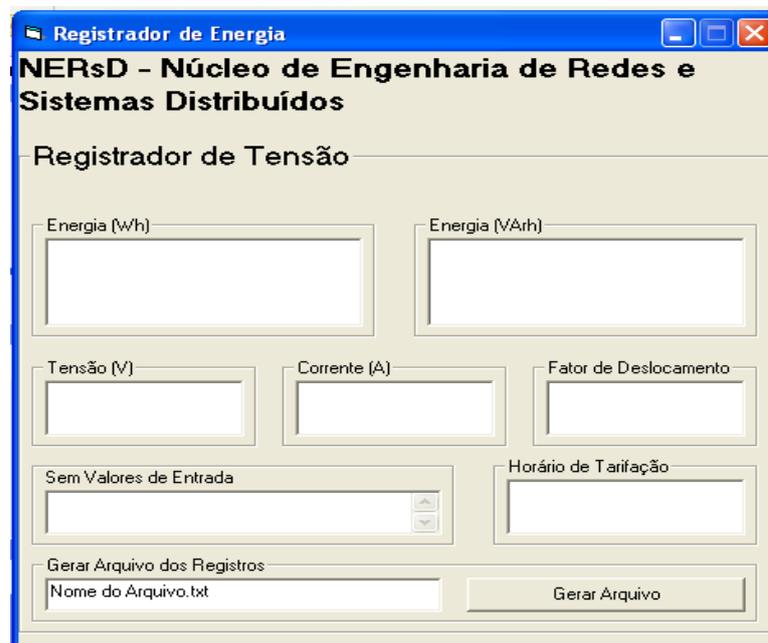


Figura 5 – Interface de medição.

4.3 Calibração

Para a calibração do protótipo utilizou-se a planilha do *MS Excel FE427_Settings.xls*, conforme indica (TI, 2005). Nesta planilha inseriu-se os dados de projeto como tensão e corrente nominais, valores do divisor resistivo e tipo de sensor de corrente utilizado. Como valores de retorno, a planilha fornece os parâmetros de calibração que são salvos no arquivo *ESP_Parameter.h*, que deve ser adicionado aos arquivos de projeto para o processo de compilação e montagem do código a ser gravado no microcontrolador.

5 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Com o objetivo de se estabelecer às características reais de funcionamento do medidor proposto, foram determinadas algumas condições de teste e avaliados seus resultados em termos de erro percentual, comparando protótipo a um registrador comercial de energia elétrica. Os valores de erro obtidos foram ainda comparados aos padrões da norma NBR14519, para especificação de medidores eletrônicos de energia elétrica.

Os testes realizados em laboratório tiveram as seguintes condições:

- Sinais de tensão e corrente senoidais e de mesma frequência igual a 60Hz;
- Carga resistiva de 200Ω/200W e resistiva/indutiva de 200Ω/87mH/200W;
- Energia calculada a partir do produto das tensões e correntes eficazes V e I, com intervalo de tempo igual ao intervalo de demanda definido pela NBR14522;
- Frequência de amostragem de 4096 amostras/segundo;
- Erro relativo percentual de acordo com a “Equação 4”:

$$e(\%) = \frac{E_c - E_p}{E_c} \cdot 100 \quad (4)$$

Sendo E_p a energia medida pelo protótipo e E_c a energia medida pelo registrador comercial.

Estabelecidas as condições de ensaio, as medidas realizadas para carga resistiva são apresentadas através da “Tabela 1” e “Figura 11”.

Tabela 1 – Ensaio com carga resistiva.

Tensão (V)	Corrente (I)	FD (cos ϕ)	Registrador Comercial	Protótipo	Erro relativo (%)
			Energia (Wh) E_c	Energia (Wh) E_p	
208	1,04	0,99	58,66	57,91	+1,28
206	1,02	0,99	117,31	115,57	+1,48
207	1,04	0,99	234,84	232,2	+1,12
207	1,03	0,99	468,14	463,21	+1,05
206	1,04	1	936,12	923,29	+1,30
207	1,02	0,99	1871,9	1845,76	+1,39
207	1,03	1	3743,52	3691,57	+1,38
206	1,03	0,99	7487,34	7397,48	+1,20

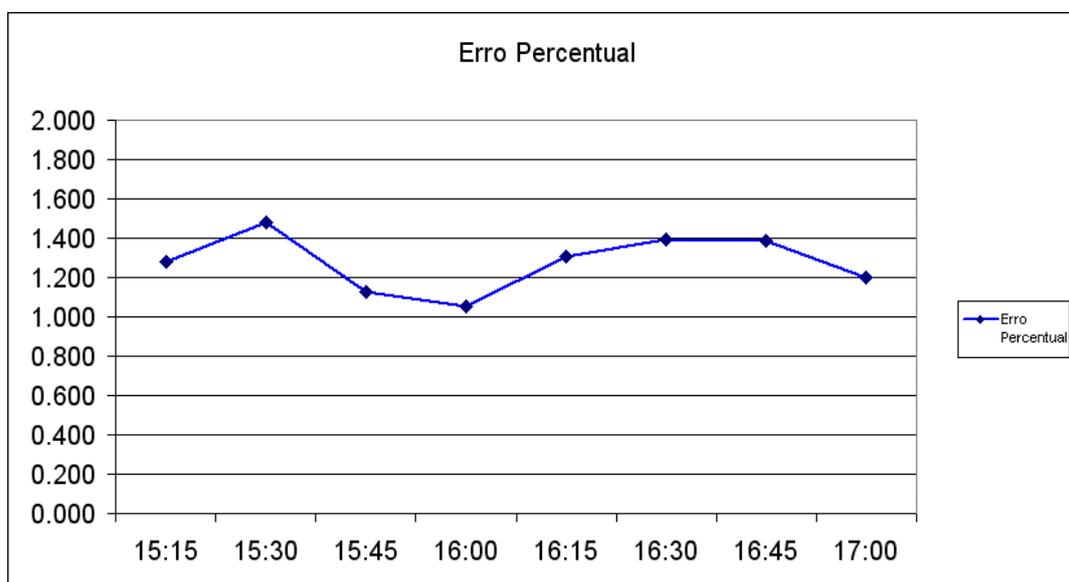


Figura 11 – Erro percentual com carga resistiva.

Nota-se que o erro varia entre 1,05% e 1,48%, valores estes que seguem a tendência de erro dentro dos parâmetros definidos pela NBR14519, que estabelece a classe de exatidão percentual de 0,2, 0,5, 1,0 e 2,0.

Comparando o valor obtido com a norma demonstra-se que o sistema em teste encontra-se dentro dos valores exigidos pela NBR 14519, mas não pode-se afirmar que o sistema está dentro do padrão estabelecido, pois o ensaio realizado não está de acordo com os ensaios contidos nesta norma.

Os testes com carga resistiva/indutiva são apresentados na “Tabela 2” e “Figura 12”, a seguir.

Tabela 2 – Ensaio com carga resistiva/indutiva.

Tensão (V)	Corrente (I)	FD (cos φ)	Registrador Comercial	Protótipo	Erro relativo (%)
			Energia (Wh) E_c	Energia (Wh) E_p	
202	0,833	0,93	39,12	38,36	+1,95
203	0,831	0,92	77,59	76,12	+1,90
203	0,839	0,92	117,51	115,58	+1,98
203	0,839	0,92	156,69	153,58	+1,98
204	0,835	0,92	195,89	192,09	+1,94
206	0,835	0,92	237,37	233,45	+1,65
206	0,839	0,93	281,28	275,93	+1,90
205	0,835	0,92	314,96	308,79	+1,96

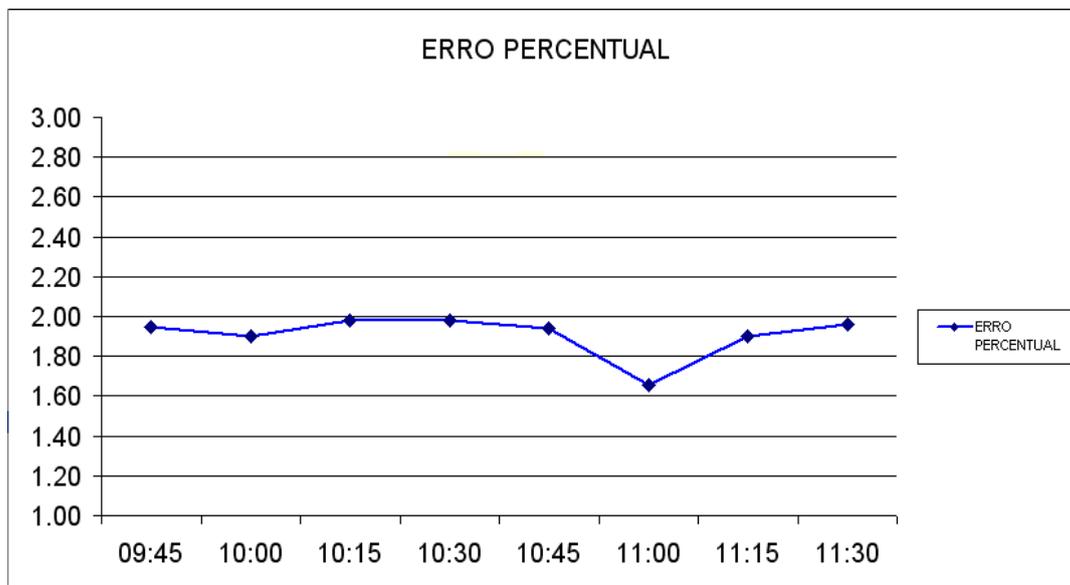


Figura 12 – Ensaio com carga resistiva/indutiva.

Com parcela indutiva na carga, o protótipo proposto apresenta comportamento que atende a norma NBR14519, com limite de índice de classe 2,0. Porém, não pode-se afirmar que o protótipo atende as exigências de erro da NBR14519, pois os ensaios realizados não são os mesmos ensaios definidos pela norma.

6 CONCLUSÕES E PROPOSTAS FUTURAS

Com o trabalho de conclusão de curso busca-se a integração da teoria da graduação, com a prática exigida pelo mercado de trabalho. Quando este trabalho está diretamente ligado a uma empresa ou instituição, esta integração torna-se estreita e a formação acadêmica mais focada nas necessidades do mercado.

No trabalho apresentado, esta integração ocorre da interação do projeto de P&D desenvolvido pelo NERsD, em parceria com as empresas CELESC e W2B, com o objetivo de desenvolver um protótipo de medidor eletrônico de energia elétrica, sendo que este é um dos componentes do sistema a ser implantado com o projeto GLD Infra.

Esta integração entre teoria e prática pode ser exemplificada pela utilização das bases de eletrônica analógica e digital, que no projeto puderam ser aplicadas durante o desenvolvimento da placa de circuito impresso e das interfaces de entrada para tensão e corrente. Os conhecimentos em programação, especialmente a linguagem C para microcontroladores e comunicação de dados, na implantação do protocolo serial da norma NBR 14522 também foram de vital importância. Citam-se também as unidades curriculares de conversores A/D, processamento digital de sinais como bases para a execução das atividades de desenvolvimento do protótipo.

O protótipo construído em sua forma atual apresenta um erro inferior a 2%, tanto para carga resistiva quanto para carga resistiva/indutiva. Conforme o esperado e estando dentro dos valores de erro percentual estabelecidos pela NBR 14519. Mas não pode-se considerar que o medidor atende as exigências da norma, pois os testes realizados não contemplaram carga nominal, nem obedeceram aos ensaios estabelecidos pela mesma norma, visto que o comparativo foi estabelecido com um registrador comercial de energia ao invés de um medidor de energia padrão.

A etapa de comunicação a que se propôs o trabalho foi concluída com êxito. Visto que o protocolo serial na NBR 14522 foi implementado e testado com sucesso e tendo este protocolo sido alterado com o acréscimo dos dados medidos de tensão, corrente e fator de deslocamento ($\cos \varphi$), pois estes são dados que podem ser medidos com o dispositivo utilizado.

Na realização do projeto buscou-se o caráter de baixo custo para o medidor eletrônico, com um limite esperado de cerca de R\$ 100 de custo final para a confecção do protótipo. A preocupação com o baixo custo do protótipo proposto é justificável para que seu uso possa se difundir ao maior número possível de unidades consumidoras, para que os desejáveis efeitos de seu emprego possam surtir efeito tanto do lado do cliente quanto do lado da concessionária.

A não utilização de display LCD, TP, TC, a utilização de uma solução integrada (MSP430) que permite em um único *chip* dispor-se de grande parte dos periféricos necessários à medição, foram algumas preocupações para garantir, no desenvolvimento do protótipo, o caráter de baixo custo do projeto (SILVA, 2007).

A implementação de um medidor digital de energia elétrica se apresenta como uma eficiente solução, pois além da confiabilidade que um equipamento como este apresenta, também facilitaria a mudança nos procedimentos de medição, pois a utilização de dispositivos especializados na medição de energia elétrica, além da uma variada faixa de grandezas elétricas que podem ser medidas, permite também automatizar o processo de medição, diminuir as perdas das concessionárias de energia, que anualmente perdem alguns milhões de reais em furtos de energia, os “gatos”, e também atuar sobre as cargas instaladas por meio de desligamentos por inadimplência ou venda de energia na forma pré-paga.

Tratando este trabalho como parte de um projeto de P&D, vários pontos levantados não puderam ainda ser implementados, logo deixam-se estes apontamentos como propostas para implementações futuras:

- Investigação e implementação de melhor proteção para os circuitos de entrada de sinal, para evitar que sinais espúrios oriundos da rede elétrica como surtos ou quedas bruscas de tensão danifiquem o medidor;
- Estudo de projeto de filtros para medição e instrumentação;

- Melhoria da interface de comunicação com a implementação de outros protocolos descritos na NBR 14522, que tem melhor controle sobre o fluxo dos dados e conexão do medidor com o concentrador;
- Implementação de interface com *smart card* ou cartão de memória *FLASH* para uso de sistema de venda de energia na forma de pré-pagamento;
- Melhoria no projeto da placa de circuito impresso para melhorar a compatibilidade eletromagnética.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Estabelece, de forma atualizada e consolidada, as Condições Gerais de Fornecimento de Energia Elétrica**: Resolução 456 de 29 de novembro de. 2000. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/cedoc/res2000456.pdf>> Acesso em 11 de mar. 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14519**: Medidores Eletrônicos de Energia Elétrica (Estáticos) - Especificação. Rio de Janeiro, 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14522**: Intercâmbio de Informações para Sistemas de Medição de Energia Elétrica - Padronização. Rio de Janeiro, 2000.

BIERL, L. **MSP430 Family Mixed-Signal Microcontroller Application Reports**: SLAA024. Usa: Texas Instruments, 2000.

BRASIL. MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO. **A Organização da Educação Profissional de Nível Tecnológico**. Disponível em <<http://portal.mec.gov.br/setec/index.php?option=content&task=view&id=160&Itemid=277>> Acesso em 15 de mai. 2007.

FERREIRA, A.; RAMIREZ, A. R. G. **Monitoramento Elétrico Residencial: Uma abordagem usando DSP**. Revista de Automação e Tecnologia da Informação, Florianópolis/CTAI, v. 2, p. 106-110, 2003.

FILHO, S.M. **Medição de Energia Elétrica**. 7. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1997.

ITO, H.T. **Energia Elétrica**: Apuração da Qualidade dos Dados de Consumo. 2003. 97 f. Dissertação (Mestrado) - Unicamp, Campinas.

MAXIM. **+5V-Powered, Multichannel RS-232 Drivers/Receivers**. Dallas, 2006. Disponível em: <<http://fribotte.free.fr/bdtech/download/6811/max232.pdf>> Acesso em 20 de fev. 2007.

MICROSYSTEMS, A. **ACS750xCA-100**: Current Sensor. Massachusetts, 2005. Disponível em: [http://www.allegromicro.com/en/products/Part Numbers/0750/0750-100.pdf](http://www.allegromicro.com/en/products/Part%20Numbers/0750/0750-100.pdf) Acesso em 10 out. de 2006

MIRANDA, M.D.; **Um medidor digital de energia elétrica**. 1987. 95f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

NASCIMENTO, J. C. do. **Sistema Eletrônico de Medição de Energia Elétrica com Pré-Pagamento utilizando Smart Card**. Congresso Brasileiro de Automação de Prédios Inteligentes, 2002.

NOLL, V.; JR., C. F.; BONACORSO, N. G.; SCHMIDT, I.; SOUZA, A. A. de. **Correção Ativa de Fator de Potência Trifásico Usando Microcontrolador**. 2005. Disponível em: <<http://www.cefetsc.edu.br/~vnoll/ArtigoCAFP.pdf>>. Acesso em 22 mar. de 2007.

PEREIRA, F. **Microcontroladores MSP430: Teoria e Prática**. São Paulo: Érica, 2005.

SILVA, R.L. **Medidor de Energia Elétrica de Baixo Custo com Interface Serial Compatível com a NBR 14522**. 2007. 112 f. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) - Curso de Superior de Tecnologia em Sistemas Digitais, Departamento de Acadêmico Eletrônica, CEFET/SC, Florianópolis, 2007.

TEXAS INSTRUMENTS. **Implementing An Electronic Watt-Hour Meter With The MSP430FE42x Devices: SLAA 203b**. Dallas, 2005. Disponível em: <<http://focus.ti.com/lit/an/slaa203b/slaa203b.pdf>> Acesso em 15 ago. de 2006.

USATEGUI, J.M.A.; MARTÍNEZ, Inácio Ângulo. **MICROCONTROLADORES PIC: DISEÑO PRAC. DE APLICACIONES 16F84**, 3. ed. Madri: Mcgraw-hill, 1999.

UTFPR. Cursos Superiores de Tecnologia – O Desafio de uma nova proposta. Disponível em <<http://www.cefetpr.br/cefet/cursos/informacoestecnologia.pdf>> Acesso em 15 de mai. 2007.

INTEGRATING SCHOOL AND COMPANY THROUGH THE TCC: LOW COST ELECTRONIC ENERGY METER COMPATIBLE WITH STANDARD NBR 14522

Abstract: *This paper shows the integration between school and enterprises through the development of graduate course conclusion's of the Digital System Technology Graduate Course of the Federal Center of Technological Education of Santa Catarina (CEFET-SC). The objective of the work was the implementation of a single-phase electronic energy meter, with serial interface communication compatible with the Brazilian standard NBR14522. The development of this became possible through a partnership between a Distributed Systems and Network Engineering Nucleus (NERsD) of CEFET-SC, the electric energy distribution company – Electric Central of Santa Catarina (CELESC) and a private company W2B Ltda Communications. In this work the technological bases and operacional impacts had been presented, focused in the development of a low cost solution.*

Key-words: *Microcontrollers, Measurement of electric energy, MSP430, conclusion's course work.*