

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA  
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

FAIOSSANDER SUELA

**TARIFADOR DIGITAL DE ENERGIA ELÉTRICA**

VIÇOSA  
2013

FAIOSSANDER SUELA

## **TARIFADOR DIGITAL DE ENERGIA ELÉTRICA**

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas da Universidade Federal de Viçosa, para a obtenção dos créditos da disciplina ELT 490 – Monografia e Seminário e cumprimento do requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Leonardo Bonato Felix.

VIÇOSA  
2013



**FAIOSSANDER SUELA**

**TARIFADOR DIGITAL DE ENERGIA ELÉTRICA**

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas da Universidade Federal de Viçosa, para a obtenção dos créditos da disciplina ELT 490 – Monografia e Seminário e cumprimento do requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Aprovada em 27 de Agosto de 2013.

**COMISSÃO EXAMINADORA**

---

**Prof. Dr. Leonardo Bonato Felix - Orientador**  
**Universidade Federal de Viçosa**

---

**Prof. B.Sc. Paulo Fábio Figueiredo Rocha - Membro**  
**Universidade Federal de Viçosa**

---

**Eng. M.Sc. André Luís Carvalho Mendes - Membro**  
**Universidade Federal de Viçosa**

*“Enquanto a cor da pele for mais importante que o brilho dos olhos, haverá guerra”.*  
*(Bob Marley)*

*Esta monografia é dedicada a meus pais Fioravante José Suela e Angela  
Maria dos Reis Suela, A minha namorada Aline e a Minha Filha Rayne.*

## *Agradecimentos*

Alguns anos se passaram e muitos desafios foram superados. Hoje comemoro mais essa vitória, mas sozinho não teria conseguido. Aproveito então para agradecer a todos que me ajudaram a realizar meu sonho. Gostaria de agradecer, em primeiro lugar, aos meus pais, Angela e Fioravante, pelo apoio, incentivo e por toda dedicação. A minha irmã Karoliny pelo carinho e admiração, aos meus primos Wátala e Attawan pelos bons momentos que vivemos. Enfim a toda minha família pela confiança que sempre tiveram em mim. A minha namorada Aline pelo companheirismo e compreensão durante toda essa etapa da minha vida. A minha princesa Rayne que me mostrou a enorme felicidade que um filho pode nos proporcionar. Agradeço aos novos amigos que conquistei e, aos velhos amigos, pelos bons momentos. Ao meu orientador Leonardo Bonato Felix, por toda orientação e suporte para o desenvolvimento do projeto. Aos demais professores do DEL por suas contribuições em minha formação profissional e pessoal. A Universidade Federal de Viçosa por todo o suporte e estrutura que oferecem para o meu desenvolvimento científico e a CNPq pelo apoio financeiro concedido, sem o qual esta pesquisa não teria sido possível.

## *Resumo*

Este projeto aborda a construção de um protótipo de um tarifador digital de energia elétrica, que consiste em um dispositivo capaz de informar em tempo real o consumo e a tarifação de energia elétrica de uma carga através da monitoração da tensão e da corrente elétrica da mesma. Neste projeto são abordados os aspectos teóricos sobre a obtenção da energia elétrica a partir dos sinais de tensão e corrente medidos nos terminais da carga. Os circuitos que constituem o protótipo são descritos de forma modular, identificados como módulo de alimentação, módulo de aquisição e condicionamento de sinais e módulo de processamento. Os ensaios foram realizados no laboratório e os resultados obtidos foram apresentados, conduzindo a conclusão de que os mesmos são satisfatórios, pois são coerentes com a abordagem teórica descrita.

# Sumário

Agradecimentos.....	7
Resumo.....	8
1 Introdução.....	12
1.1 Contexto Atual.....	12
1.1.1 Geração distribuída e <i>Smart Grid</i> .....	12
1.2 Proposta de Trabalho.....	15
1.3 Fundamentação Teórica.....	15
1.3.1 Energia e Potência.....	16
1.3.2 Fator de Potência.....	17
1.3.3 Tarifação de Energia Elétrica.....	20
1.4 Objetivo.....	22
2 Materiais e Métodos.....	23
2.1 Módulo de Alimentação.....	23
2.2 Módulo de Aquisição e Condicionamento dos Sinais.....	24
2.2.1 Sensor de Tensão.....	24
2.2.2 Sensor de Corrente.....	25
2.2.2 Deslocamento da curva de tensão.....	27
2.3 Módulo de Processamento.....	29
2.3.1 Microcontrolador PIC 16F877.....	29
2.3.2 Display LCD.....	30
2.3.3 Conversão A/D.....	31
2.3.4 Medição do Fator de Potência.....	33
2.3.5 Análise do Processo de Tarifação.....	33
2.3.6 Esquema Geral do Protótipo.....	35
3 Resultados e Discussões.....	36
3.1 Ensaio para obtenção dos resultados.....	36
3.2 Discussão dos Resultados.....	37
4 Conclusões.....	38
Referências Bibliográficas.....	39

## *Lista de Figuras*

Figura 1: Representação do sinal senoidal de corrente e de tensão.....	17
Figura 2: Triângulo de Potências.....	18
Figura 3: (a) Tensão e corrente com defasagem nula; (b) Onda de corrente atrasada em relação à onda de tensão; (c) Onda de corrente adiantada em relação à onda de tensão.....	19
Figura 4: Custos distintos cobrados na conta de Luz. ....	20
Figura 5: Gastos para cada componente presente em uma conta de energia elétrica da CEMIG. ....	21
Figura 6: Ligação do TDE na carga a ser tarifada. ....	23
Figura 7: Fonte de tensão simétrica.....	24
Figura 8: Sensor de Tensão. ....	25
Figura 9: Pinagem do Sensor Hall.....	25
Figura 10: Configuração típica do sensor.....	26
Figura 11: Tensão de saída versus corrente de pico no sensor.....	27
Figura 12: Circuito deslocador de sinais. ....	28
Figura 13: Pinagem do microcontrolador PIC 16F877. ....	30
Figura 14: Conversão dos sinais de corrente e tensão.....	32
Figura 15: Fluxograma. ....	34
Figura 16: Esquemático completo do dispositivo.....	35
Figura 17: Montagem para realização dos ensaios.....	36

## *Lista de Tabelas*

Tabela 1: Utilização da pinagem do controlador no circuito.....	31
Tabela 2: Descrição das funções dos botões de interface do dispositivo. ....	33
Tabela 3: Resultados dos ensaios. ....	37

# ***1 Introdução***

## **1.1 Contexto Atual**

O intenso crescimento do sistema de distribuição de energia elétrica tem feito com que a automatização do processo de medição de grandezas elétricas se torne realidade em diversas concessionárias. Nos últimos anos várias empresas de instrumentos de precisão e até mesmo as próprias concessionárias têm atuado em pesquisas nesse assunto, apresentando novos equipamentos.

As atuais técnicas de medição são bastantes rústicas comparadas com o tamanho desenvolvimento tecnológico alcançado pelo homem, um bom exemplo é que o modelo atual de medição elétrica não permite aos consumidores prever e assim controlar seu consumo mensal de energia, em outras palavras, para o consumidor, não existe de maneira prática, um equipamento de medida portátil, capaz de medir em tempo real o valor monetário a ser pago pelo consumo de uma carga de maneira simples e de baixo custo.

Em uma época em que as informações são imprescindíveis, e sistemas computacionais estão por toda parte, cada vez mais o ser humano precisa de dados disponíveis e de estatísticas de funcionamento do que os cercam. Sabemos que os aparelhos eletroeletrônicos estão cada vez mais acessíveis à sociedade, e que as indústrias estão investindo cada vez mais em novas tecnologias, aumentando consideravelmente a demanda de energia elétrica, tornado assim, imprescindível ao consumidor maior controle no uso desta energia. Tudo isso vem incentivando novos conceitos na área de energia, que visa uma modernização das tecnologias de geração, transmissão e distribuição e o consumo de energia elétrica. Alguns desses conceitos serão discutidos a seguir.

### **1.1.1 Geração distribuída e *Smart Grid***

Os sistemas de energia elétrica estão prestes a sofrer uma transformação de grandes proporções. Essa transformação consiste na modernização das tecnologias de geração, transmissão, distribuição e uso final da energia elétrica, visando abordar questões que vão desde as preocupações com mudanças climáticas até a possibilidade de proporcionar ao usuário final maior participação no gerenciamento do sistema elétrico. Essa nova concepção atende pelo nome genérico de *Smart Grid*.

A expressão *Smart Grid* deve ser entendida mais como um conceito do que uma tecnologia ou equipamento específico. Baseia-se na utilização intensiva de tecnologia da informação, automação e comunicações para monitoração e controle da rede elétrica, a qual permitirá a implantação de estratégias de controle e otimização da rede de forma muito mais eficiente. A introdução do conceito de *Smart Grid* produzirá uma convergência acentuada entre a infra-estrutura de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica e a infra-estrutura de comunicações digitais e processamento de dados.

As principais características das Redes Elétricas Inteligentes são:

- Sistemas de medição centralizada baseados na utilização de medidores inteligentes e redes de comunicação de dados dedicadas, os quais permitirão uma comunicação bidirecional entre as empresas concessionárias do serviço de energia elétrica e os clientes;
- Sensores, atuadores e controladores inteligentes distribuídos ao longo da rede que permitirão a reconfiguração da mesma automaticamente em caso de falhas nos componentes, reduzindo o tempo de interrupção do fornecimento de energia;
- Facilidade de conexão e desconexão à rede elétrica de geradores de pequeno e médio porte e dispositivos armazenadores de energia, utilizando procedimentos similares ao *plug-and-play* dos equipamentos de computação.

As características acima proporcionarão mudanças substanciais no funcionamento dos sistemas de energia elétrica nos seguintes aspectos:

- Gerenciamento da Demanda: a possibilidade de aquisição e comunicação rápida de informações de consumo e tarifas de energia variáveis no tempo permitirão uma melhoria no perfil de consumo de energia elétrica, eliminando picos de consumo e, portanto, reduzindo os requisitos de novas usinas e linhas de transmissão de energia e, conseqüentemente, seus impactos ambientais e econômicos;
- Segurança e Qualidade: a disponibilização de recursos para reconfiguração automática da rede elétrica permitirá um elevação no nível de confiabilidade no suprimento de energia elétrica. Nas redes de distribuição, a reconfiguração automática permitirá o rápido isolamento de partes afetadas da rede e o restabelecimento do fornecimento à maior parte dos clientes; na transmissão, a utilização de recursos como os PMUs (*Phasor Measurement Units*), os quais consistem em sistemas de medição de grandezas

elétricas em pontos geograficamente distantes e sincronizados através de sinais de GPS, permitirá a detecção de situações potencialmente catastrófica e reduzir a probabilidade de ocorrência de blecautes;

- Geração Distribuída e Armazenamento de Energia: a facilidade de conexão de geradores de médio porte (poucos MW) e pequeno porte (poucos kW) às redes de distribuição em média ou baixa tensão, proporcionada pelas Redes Elétrica Inteligentes, reforçará uma tendência já observada em passado recente da introdução da geração distribuída em complementação às grandes centrais geradoras; em particular, a utilização de fontes alternativas, tais como fotovoltaica e eólica, que apresenta a vantagem de reduzir o impacto ambiental de grandes centrais de geração e sistemas de transmissão a longa distância, além de proporcionar ao cliente a possibilidade de produzir e armazenar sua própria energia, sendo possível a ele vender essa energia para a concessionária.

O cliente do serviço de energia elétrica, particularmente o consumidor residencial, tem um comportamento passivo na rede elétrica atual. Com a introdução das tecnologias de Smart Grid essa situação poderá sofrer uma mudança substancial. A primeira grande mudança virá com a variação horária e sazonal do custo da energia que permitirá ao mesmo otimizar a utilização desse recurso.

No Brasil este modelo já vem sendo discutida e a adoção do novo modelo denominado de Tarifa Branca tem previsão para entrar em vigor já no próximo ano, no entanto, existem muitos protestos de pessoas que argumentam não haver elementos suficientes para garantir que sua aplicação implicará em benefícios para consumidores e distribuidoras. Essa tarifação dinâmica poderá ser otimizada automaticamente, através dos recursos de automação residencial, ou através de serviços especiais para esse fim oferecidos pela Internet [1].

Esses são conceitos cada vez mais discutidos e já vem sendo implementados em alguns lugares do mundo, inclusive no Brasil, como é o exemplo da cidade de Sete Lagoas em Minas Gerais, que através de subsídios do governo e ajuda da CEMIG vem implementando os modelos discutidos em diversas residências.

É evidente que para a implementação de todos os conceitos discutidos nesta secção é necessário a integração da rede elétrica aos sistemas digitais, tornando-se assim muito importante pesquisas nesta área.

## **1.2 Proposta de Trabalho**

Este projeto consiste na construção do protótipo de um Tarifador Digital de Energia elétrica (TDE). O protótipo será um dispositivo portátil capaz de fornecer o consumo e o valor monetário a ser pago pelo uso de uma determinada carga através da monitoração da tensão, corrente e o ângulo de fase entre estas duas grandezas, exibindo assim as informações em tempo real, as quais podem ser usadas para diversas aplicações.

A principal motivação para a realização deste trabalho é dar ao consumidor a possibilidade de saber a quantidade de energia consumida e o valor monetário gasto no momento do uso de uma determinada carga, já que não é comum para o consumidor saber quanto custa um banho ou quanto custa uma lâmpada acesa durante a noite, permitindo assim maior controle sobre seus gastos com energia elétrica.

Além disso, com o mercado cada vez mais competitivo, as indústrias estão investindo pesado em novas tecnologias, tornando extremamente importante o constante monitoramento do consumo de energia, que poderá ser feito em tempo real através do TDE, ou até mesmo, verificar se uma determinada máquina está consumindo mais energia do que o normal, detectando assim possíveis defeitos de funcionamento, tornando a manutenção da indústria mais eficiente, já que alguns problemas poderão ser detectados precocemente.

A implementação de um sistema com tais características só se tornaram possíveis com os avanços em termos computacionais, os quais possibilitaram a conversão de uma grandeza analógica em dados digitais, além do sistema de controle moderno que torna capaz implementar transdutores de alto grau de confiabilidade.

## **1.3 Fundamentação Teórica**

Para um processo de medição em geral, é necessário à utilização de um dispositivo que seja capaz de medir as grandezas físicas envolvidas. Neste caso para o cálculo de tarifação de energia elétrica, é necessário calcular primeiro a energia consumida por uma determinada carga, através das medidas de tensão e de corrente.

Assim o equipamento experimental, foco deste trabalho, possui características de funcionamento baseadas nos conceitos de circuitos elétricos. O protótipo é capaz de realizar cálculos envolvendo tensão, corrente, potência, energia e fator de potência que são quesitos

teóricos clássicos no ambiente de estudo da eletricidade, portanto, se faz necessária à abordagem destes assuntos [2].

### 1.3.1 Energia e Potência

Com dados dos sinais relativos à tensão e corrente pode-se calcular a potência elétrica instantânea da carga em medição. Em sistemas elétricos, a potência instantânea medida por um dispositivo de dois terminais é o produto da tensão e corrente que passa através do dispositivo, definida por:

$$p(t) = v(t) * i(t), \quad (1)$$

onde  $i(t)$  é o valor instantâneo da corrente e  $v(t)$  é o valor instantâneo da tensão. Se a corrente está em ampères e a tensão em volts, a potência estará em watts. Num sistema de corrente contínua em que a corrente e tensão se mantêm em regime permanente, a potência transmitida é também constante e igual ao produto destas grandezas. Porém, a natureza do sinal elétrico que o dispositivo TDE tratará é do tipo alternada, ou seja, variante no tempo, que é fornecida pela concessionária de energia elétrica, sendo assim, torna-se necessário calcular a média da potência no tempo, que corresponde à potência ativa.

Nos sistemas em que a corrente ou a tensão são variáveis temporais, é possível determinar a potência média desenvolvida durante um período de tempo  $T$  a partir da integração temporal da potência instantânea por meio da equação.

$$P_{med} = \frac{1}{T} \int_0^T v(t).i(t)dt, \quad (2)$$

sendo  $i(t)$  o valor da corrente no instante  $t$ ,  $v(t)$  o valor da tensão no mesmo instante, e  $T$  é um período do sinal.

Para sistemas digitais onde os dados são de natureza discreta, para calcular a média da potência há necessidade de se obter a cada instante uma amostra (valor) dos sinais de tensão e de corrente e realizar em cada instante a multiplicação destes pontos, obtendo o valor de uma amostra da potência. O somatório dos valores das potências obtidas, dividido pela quantidade de amostras, corresponde à potência média. Matematicamente, tem-se, a equação (3).

$$P_{med} = \frac{1}{k} \sum_1^k (v. i), \quad (3)$$

onde  $k$  é a quantidade de amostras correspondente a um intervalo de tempo,  $v$  e  $i$  são valores de tensão e de corrente respectivamente.

Em circuitos de corrente alternada (CA) puramente resistivos, as ondas de tensão e de corrente elétrica estão em fase. A representação de sinais de tensão e corrente em uma carga resistiva é apresentada na Figura 1.

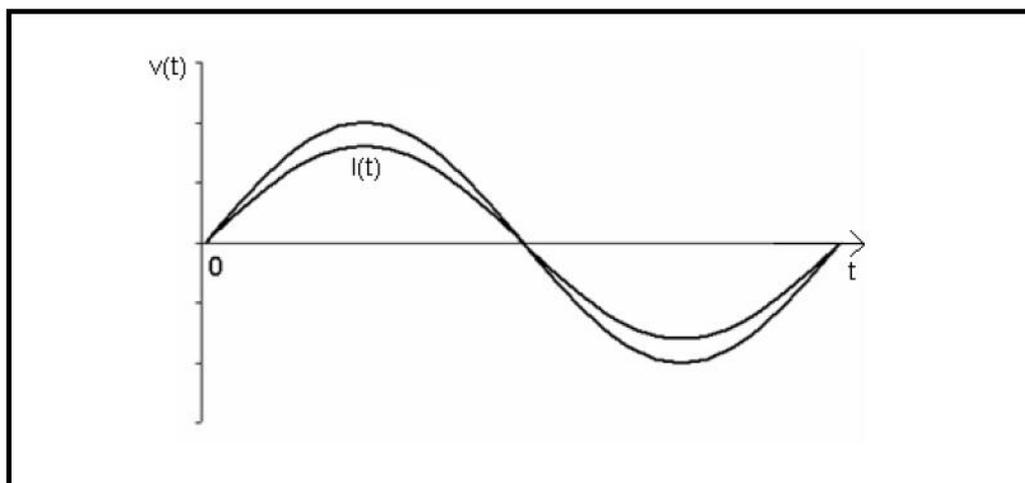


Figura 1: Representação do sinal senoidal de corrente e de tensão.

A potência é a quantidade de energia consumida por unidade de tempo. Logo, a obtenção da quantidade de energia elétrica em um intervalo de tempo  $(t_2 - t_1)$  é a integral da potência no tempo, matematicamente representada através de,

$$E = \int_{t_1}^{t_2} P(t), \quad (4)$$

onde  $E$  representa a energia dada em kWh desde que a potência seja em quilowatt, e o tempo em horas.

O cálculo da energia para sinais discretos é disposto na equação,

$$E = \frac{P_{med}}{\Delta t}, \quad (5)$$

onde  $P_{med}$  é a potência média e  $\Delta t$  é o intervalo de tempo associado a quantidade de amostras  $k$ , conforme definido na equação (3) [2], [3].

### 1.3.2 Fator de Potência

Em circuitos de corrente alternada (CA) puramente resistivos, as ondas de tensão e de corrente elétrica estão em fase, ou seja, mudando a sua polaridade no mesmo instante em cada ciclo. Quando cargas reativas estão presentes, tais como capacitores ou

condensadores e indutores, o armazenamento de energia nessas cargas resulta em uma diferença de fase entre as ondas de tensão e corrente. Para o melhor entendimento deste assunto é importante definir três conceitos: Potência ativa, potência reativa e potência aparente.

A potência ativa (P) medida em Watts (W) é a potência que o circuito utiliza para produzir trabalho (gerar calor, movimento, etc.) em um determinado período de tempo. Devido aos elementos reativos da carga, a potência aparente, que é o produto da tensão pela corrente do circuito, será igual ou maior do que a potência ativa.

A potência reativa (Q) medida em Var (VAR) é a medida da energia armazenada que é devolvida para a fonte durante cada ciclo de corrente alternada. É a energia que é utilizada para produzir os campos elétrico e magnético necessários para o funcionamento de certos tipos de cargas como, por exemplo, retificadores industriais e motores elétricos.

A potência aparente (S) medida em Volt – Amperes (VA) é a potência total entregue pela rede.

O fator de potência (FP) é a relação entre a potência ativa e a potência aparente consumida por um dispositivo ou equipamento. Ou seja, é a relação entre a potência que de fato é utilizada para realização de trabalho e a potência entregue pela concessionária. Assim definimos FP como:

$$FP = \frac{P}{S}, \quad (6)$$

Para casos ideais, ou seja, formas de ondas senoidais sem distorções, as componentes de potência ativa, reativa e aparente, pode ser representadas por vetores que forma um triângulo denominado triângulo das potências. Este triângulo é mostrado na Figura 2.

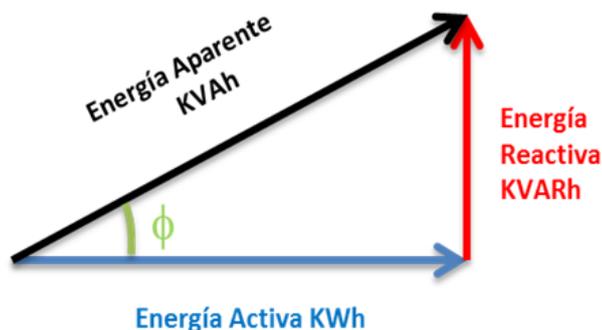


Figura 2: Triângulo de Potências.

A partir da Figura 2 e da definição de fator de potência é fácil perceber que este também pode ser definido como sendo o cosseno do ângulo  $\varphi$ .

$$FP = \cos\varphi, \quad (7)$$

O fator de potência é determinado pelo tipo de carga ligada ao sistema elétrico, que pode ser:

- Resistiva;
- Indutiva;
- Capacitiva;

Se uma carga puramente resistiva é conectada ao sistema, a corrente e a tensão mudarão de polaridade em fase, nesse caso o fator de potência será unitário. Cargas indutivas, tais como, motores e transformadores produzem potência reativa com a onda de corrente atrasada em relação à de tensão. Cargas capacitivas tais como bancos de capacitores ou cabos elétricos enterrados produzem potência reativa com corrente adiantada em relação à de tensão. A Figura 3 ilustra essas três situações.

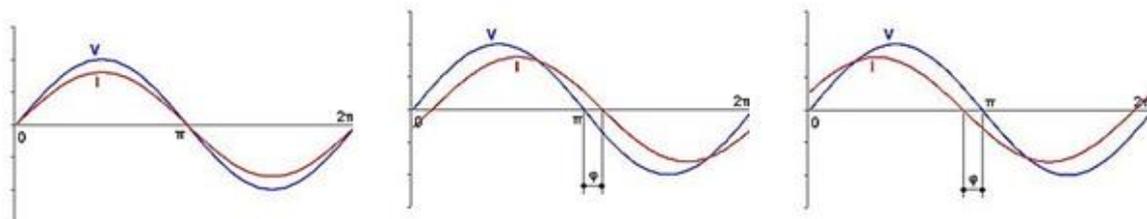


Figura 3: (a) Tensão e corrente com defasagem nula; (b) Onda de corrente atrasada em relação à onda de tensão; (c) Onda de corrente adiantada em relação à onda de tensão.

É fácil perceber que ângulo  $\varphi$  corresponde à defasagem entre as ondas de tensão e corrente geradas. Assim o fator de potência também pode ser determinado calculando o ângulo de defasagem de uma onda em relação à outra, a partir do tempo de defasagem.

$$\varphi = 2\pi \cdot \left( \frac{t_{def}}{t_{ciclo}} \right), \quad (8)$$

onde  $t_{def}$  e  $t_{ciclo}$  são os tempos em segundos da defasagem e de um ciclo completo da onda respectivamente e  $\varphi$  é expresso em radianos (rad). Para ondas senoidais de 60 Hz, temos que  $t_{ciclo} = \frac{1}{60}$  s. Assim temos que:

$$\varphi = 120\pi \cdot t_{def} \quad (9)$$

O fator de potência é usado para quantificar e tarifar as energias ativa e reativa presentes nos sistemas elétricos. Esse método é usado em quase todo mundo, inclusive no Brasil [4]. O estudo de técnicas de medição e correção do fator de potência tornam-se cada vez mais importantes, devido ao fato de que as perdas de energia aumentam com o aumento da corrente elétrica transmitida. Quando a carga possui fator de potência menor do que 1, mais corrente é requerida para suprir a mesma quantidade de potência útil.

Através do Artigo nº 95 da Resolução ANEEL nº414 de 09 de setembro de 2010, a Aneel estabelece que o fator de potência nas unidades consumidoras deve ser superior a 0,92. A mesma resolução estabelece que a medição do fator de potência pelas concessionárias é obrigatória para unidades consumidoras de alta tensão (supridas com mais de 1000 V) e facultativa para unidades consumidoras de baixa tensão (abaixo de 1000 V, como prédios comerciais, estruturas comerciais, residências em geral, entre outros), sendo assim as concessionárias estabelecem altas multas para os consumidores cuja o fator de potência de sua instalação elétrica esteja abaixo do valor estabelecido pela Aneel [5], [6], [7].

### 1.3.3 Tarifação de Energia Elétrica

No Brasil, a tarifa de energia elétrica é o preço definido pela ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica que deve ser pago pelos consumidores finais de energia elétrica. [8]. Em essência, é de se esperar que o preço da energia elétrica seja formado pelos custos incorridos desde a geração até a sua disponibilização aos consumidores, como é mostrado na Figura 4.



Figura 4: Custos distintos cobrados na conta de Luz.

A relação dos custos de cada uma dessas etapas até o consumo final varia de uma concessionária para outra, além do tipo de consumidor. Tomando como base o estado de Minas Gerais. O gráfico da Figura 5 mostra quanto o consumidor da CEMIG pagará por

componente (geração, transmissão, distribuição e encargos e tributos), caso a sua conta seja R\$ 100,00.

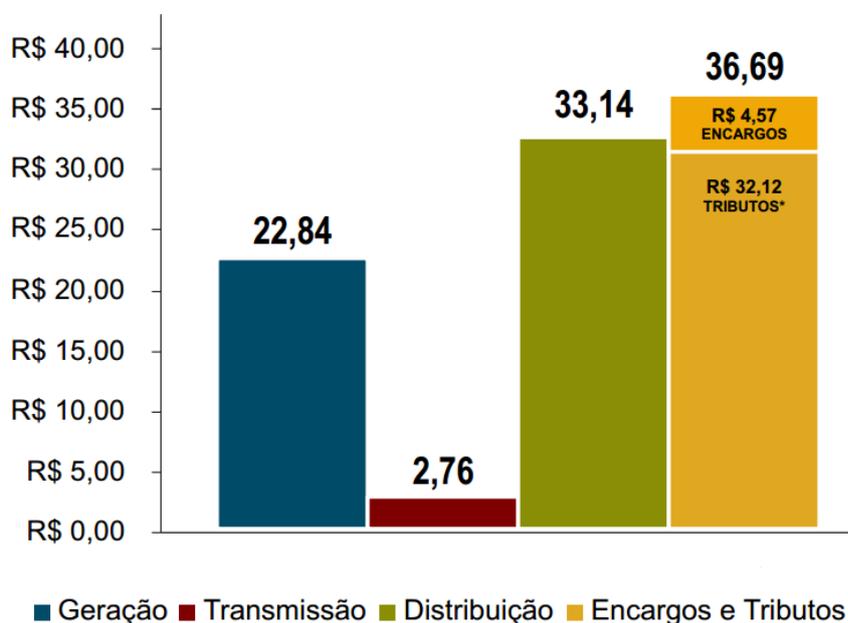


Figura 5: Gastos para cada componente presente em uma conta de energia elétrica da CEMIG.

São vários os encargos e tributos cobrados em uma conta de energia, estas taxas constituem o PIS (Programa de Integração Social) e o COFINS (Contribuição para o Financiamento da Seguridade Social) além do ICMS (Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços), que servem de base para o cálculo do custo do kWh que é calculado da seguinte forma [9], [10].

Tomaremos como base um consumidor residencial (B1) da CEMIG.

1. Alíquota média do PIS aplicado = 1,198%
2. Alíquota média da COFINS aplicado = 5,491%
3. Alíquota do ICMS aplicada ao consumidor residencial = 30 %
4. Valor kWh publicado pela resolução da ANEEL para um consumidor classificado como residencial ( $V_{ANEEL}$ ) = 0,43315 por kWh
5. Taxa de iluminação pública (IP) = R\$ 8,00

A Equação (10) mostra como é calculado o valor do kWh cobrado do consumidor.

$$Valor_{(kWh)} = \frac{Valor_{(ANEEL)}}{1-(PIS+COFINS+ICMS)}, \quad (10)$$

Para a situação em questão, temos:

$$Valor_{(kWh)} = \frac{0,43315 \text{ R\$/kWh}}{1-(0,01198+0,05491+0,3)} = 0,684162$$

De posse do valor do kWh com tributos (PIS, COFINS e ICMS), o valor total a ser pago pelo consumidor é facilmente calculada pela equação (11).

$$Valor_{(total)} = Valor_{(kWh)} \cdot E_{mês} + IP, \quad (11)$$

onde  $E_{mês}$  é a energia consumida em kWh durante o mês [10].

## 1.4 Objetivo

O objetivo deste projeto é desenvolver um dispositivo de tarifação microcontrolado capaz de informar em tempo real o valor monetário relativo ao consumo de energia elétrica de uma determinada carga. Este dispositivo poderia ser usado em um simples aparelho eletroeletrônico ou em um conjunto de aparelhos conectados a uma rede elétrica. Dessa forma, o consumidor tem a possibilidade de acompanhar o consumo de energia elétrica, e seu correspondente valor monetário, no exato momento da utilização da carga.

## 2 *Materiais e Métodos*

Para o monitoramento dos parâmetros a carga deve ser conectada de tal forma que a corrente elétrica solicitada e a tensão aplicada possam ser monitoradas pelo TDE.

A configuração do sistema está representada na Figura 6. Pode ainda ser visto na representação o barramento de saída de dados para aplicações computacionais.

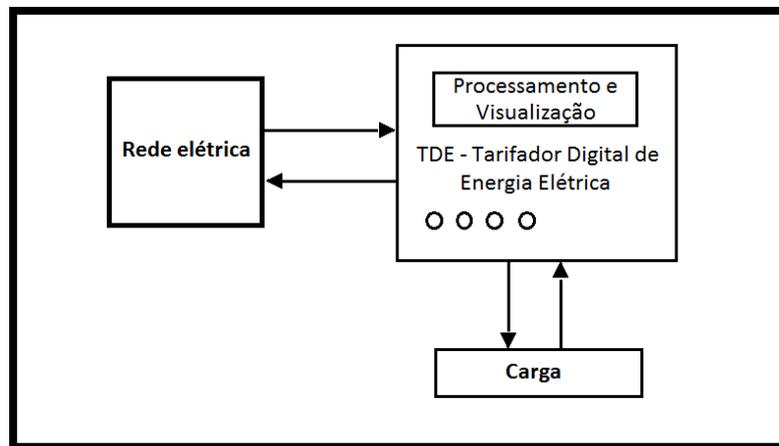


Figura 6: Ligação do TDE na carga a ser tarifada.

Neste capítulo discutiremos a metodologia que foi utilizada na construção do protótipo (TDE), esta metodologia será descrita de forma modular, identificados como, módulo de alimentação, módulo de aquisição e condicionamento de sinais e módulo de processamento.

### 2.1 *Módulo de Alimentação*

A alimentação do TDE consiste na alimentação do módulo de aquisição e condicionamento dos sinais e do módulo de processamento. Para os Amplificadores Operacionais no módulo de processamento o circuito de alimentação deve fornecer uma tensão simétrica de  $+12/-12 V_{cc}$ . Já para o Microcontrolador, o Display LCD e o Sensor de Efeito Hall, o circuito de alimentação deve fornecer uma tensão de  $5 V_{cc}$ .

Para atender estas exigências o circuito de alimentação foi construído uma fonte simétrica como é mostrado na Figura 7 [11].

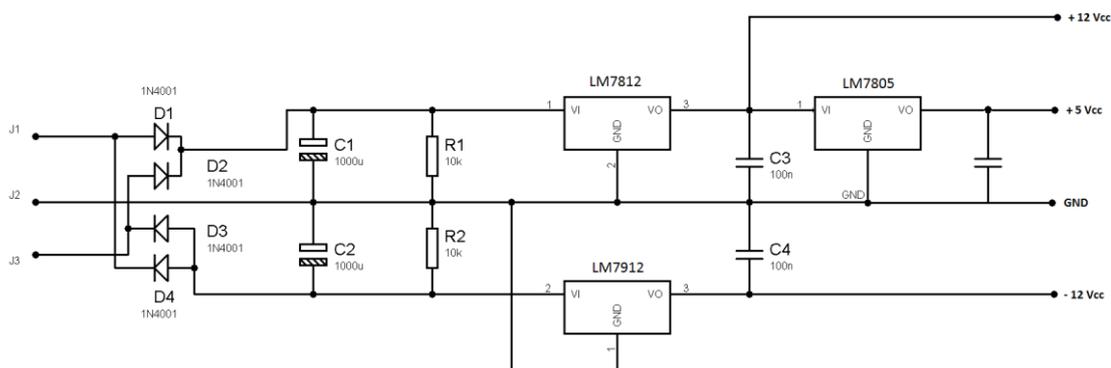


Figura 7: Fonte de tensão simétrica.

## 2.2 *Módulo de Aquisição e Condicionamento dos Sinais*

A fim de realizar as medidas das grandezas elétricas, precisávamos obter primeiramente os sinais de tensão e corrente que atuavam sobre a carga. Para isso foi utilizado um transformador como sensor de tensão e um sensor de efeito hall (ACS712ELCTR-20A-T) para medir a corrente. Como o microcontrolador suporta em suas entradas analógicas sinais com valores de pico no intervalo 0 a 5V, foi necessário também a construção de um circuito deslocador de sinais.

### 2.2.1 *Sensor de Tensão*

Essencialmente um transformador consiste em dois ou mais enrolamentos acoplados por um circuito magnético comum. Se um desses enrolamentos, o primário, for conectado a uma fonte de tensão alternada, então será produzido uma tensão alternada no secundário cujo valor é proporcional da relação de espira presentes no enrolamento primário e secundário [12].

O transformador foi o dispositivo utilizado como sensor de tensão, devido a sua propriedade de alterar a amplitude de tensão em seu enrolamento secundário, possibilitando em conjunto com um circuito divisor de tensão ajustar essa amplitude para os limites desejados. Neste caso, para uma entrada senoidal da rede de 127Vrms no primário, o transformador fornecia uma tensão de aproximadamente 18,14Vrms no secundário. Para colocar esse valor na faixa aceitável pela porta A/D do PIC, que aceita uma amplitude de 5Vpp, foi utilizado um divisor de tensão e um circuito de offset que será discutido posteriormente. O conjunto que estabelece o sensor de tensão utilizado é mostrado na Figura 8.

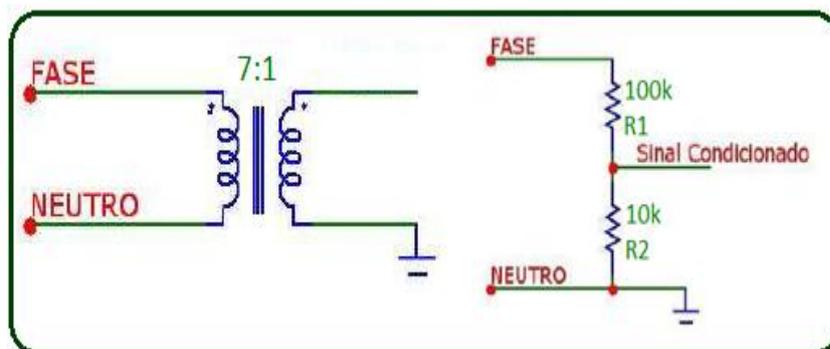


Figura 8: Sensor de Tensão.

### 2.2.2 Sensor de Corrente

O sensor utilizado no projeto foi o sensor de Efeito Hall (ACS712ELCTR-20A-T). O dispositivo consiste em um circuito preciso de baixo offset, o circuito do sensor é linear com um caminho de condução de cobre localizado perto da superfície do encapsulamento. Aplicando uma corrente que flui através deste caminho de condução, é gerado um campo magnético que é percebido pelo integrado Hall IC e convertido em uma tensão proporcional. A precisão do dispositivo é otimizado através da proximidade do sinal magnético para o transdutor Hall.

A saída do dispositivo tem uma inclinação positiva, quando há um crescente fluxo de corrente através do caminho principal de condução (de pinos 1 e 2, para os pinos 3 e 4), que é o caminho usado para a corrente de detecção. A resistência interna desse caminho condutor é  $1,2\text{ m}\Omega$ , proporcionando baixa perda de potência. A pinagem deste componente é mostrado na Figura 9.

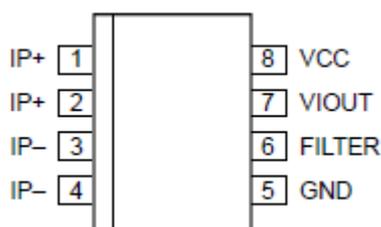


Figura 9: Pinagem do Sensor Hall.

Onde,

$IP+$  são os terminais por onde a corrente é amostrada.

$IP-$  são os terminais por onde a corrente é amostrada.

*GND* é o terminal de terra.

*FILTER* é o terminal onde é configurado através de um capacitor a largura de banda.

*VIOUT* é a saída analógica do sinal amostrado.

*VCC* é o terminal de alimentação do componente.

A configuração típica deste sensor é mostrada na Figura 10.

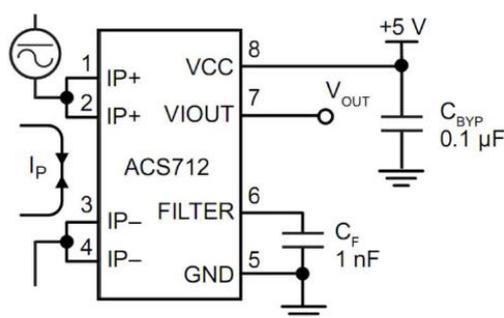


Figura 10: Configuração típica do sensor.

$I_p$  é a corrente que se quer medir.

$V_{out}$  é a saída de tensão proporcional a  $I_p$ .

$C_F$  é o capacitor de filtro.

Este sensor mede uma corrente de até 20A de pico e a saída de tensão (pino 7) é dado pela seguinte expressão.

$$V_{out} = 2,5V \pm 100mV/A, \quad (12)$$

Como pode ser observado na equação (12) o sensor fornece uma saída com um offset de +2.5V, trabalhando assim, nos limites de +0.5V e +4.5V, ou seja, esse sensor já fornece uma saída na faixa suportada pelo microcontrolador. A Figura 11 mostra a relação de corrente de entrada e a tensão correspondente na saída.

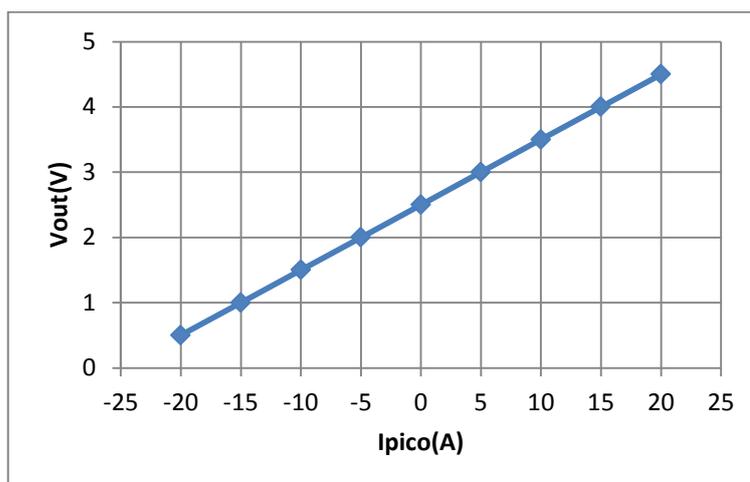


Figura 11: Tensão de saída versus corrente de pico no sensor.

Algumas características importantes deste sensor são:

- Caminho de sinal analógico com baixo ruído;
- Largura de banda do componente é configurada através do pino FILTER (pino 6);
- Erro de saída de 1,5% na  $T_A = 25\text{ }^\circ\text{C}$ ;
- 1,2 m $\Omega$  de resistência interna;
- 5V<sub>cc</sub> de alimentação;
- 100 mV/A de sensibilidade;
- Medição de corrente AC e DC;

Com essas características será feita a medida de corrente e o pino de saída (pino 7) será conectado diretamente em uma das entradas analógicas do Microcontrolador [13].

### 2.2.2 Deslocamento da curva de tensão

O sinal senoidal de tensão a ser medido está oscilando entre -2,5V e +2,5V sobre uma referencia de 0V, Como nas entradas do Microcontrolador são permitidos apenas valores de tensão no intervalo de 0 à 5V, foi necessário aumentar a referencia do sinal para 2,5V. Assim, este circuito tem por objetivo somar um sinal contínuo com um sinal alternado com o intuito de deslocar o sinal alternado de modo que possibilite a aplicação do sinal resultante na entrada do conversor A/D do microcontrolador. Na Figura 12 é apresentado o circuito deslocador de sinais implementado para esse fim.

O sinal de tensão proveniente do sensor de tensão é aplicado à entrada não inversora indicada no amplificador operacional U1 que funciona como um circuito buffer. A fonte VCC, o resistor R7 e o potenciômetro R3 constituem um circuito divisor de tensão que, conforme o ajuste realizado em R3, disponibiliza a tensão contínua a ser adicionada ao sinal presente na saída do circuito buffer (U1). Os resistores R1, R2 e R4, juntamente com o amplificador operacional U2 constituem um circuito somador inversor. Como os sinais aplicados à entrada inversora são somados e invertidos, é necessária a inversão do sinal resultante na saída do amplificador operacional U2. Por isso, o sinal é aplicado na sequência a um estágio inversor com ganho unitário composto pelos resistores R5 e R6 e pelo amplificador operacional U3. O sinal resultante na saída deste, assim, pode ser aplicado à entrada do conversor A/D do microcontrolador [2].

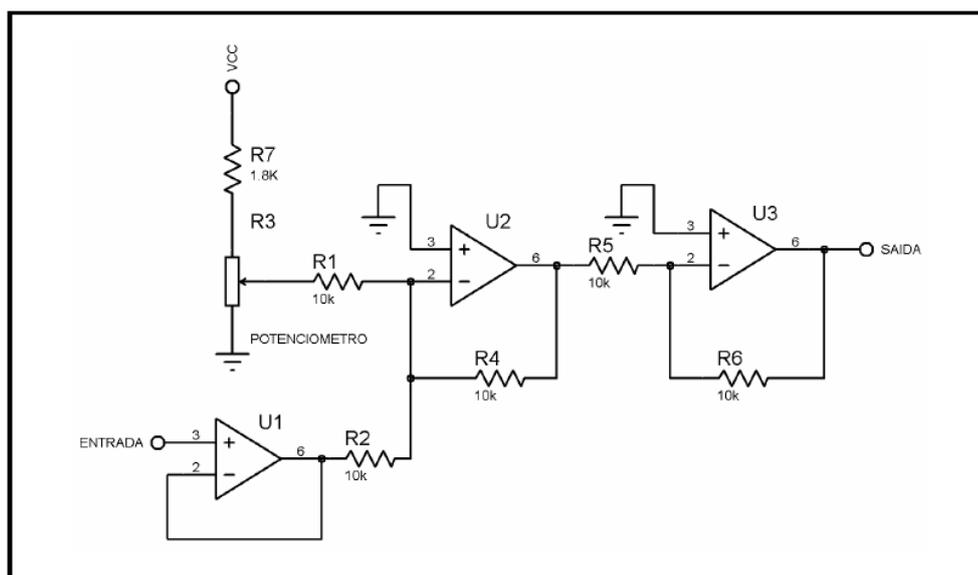


Figura 12: Circuito deslocador de sinais.

Uma vez realizada a conversão A/D, o valor de tensão adicionado externamente pode ser subtraído no programa implementado, resultando numa amostra correspondente ao sinal medido e a ser processado.

## **2.3 Módulo de Processamento**

O módulo é composto por uma unidade microcontroladora que interage com o restante do circuito em seu funcionamento. Este módulo processa os sinais recebidos do circuito de aquisição e condicionamento de sinais, e em seguida exibe os dados de medição e tarifação no display.

Este módulo também é responsável pela discretização do sinal de tensão e de corrente que é feita através do conversor A/D do Microcontrolador e por meio de um programa que neste caso foi escrito em linguagem de programação C.

### **2.3.1 Microcontrolador PIC 16F877**

O microcontrolador PIC 16F877 foi o escolhido para realização deste projeto, alguns elementos e características importantes que levou a esta escolha serão descritos com detalhes nesta secção.

Seus principais elementos são:

- Timer: temporizador para geração de interrupções periódicas.
- Counter: contadores incrementados por condição de subida ou de descida da borda de sinais digitais.
- A/D Converter: conversor Analógico-Digital de alta-resolução (de 10 bits).
- I/O Port: terminais, configuráveis por software, para servirem de entrada ou saída de sinais digitais.

O Microcontrolador PIC 16F877 é composto por 40 pinos sendo que dentre estes são 33 pinos como portas configuráveis. A pinagem do componente circuito integrado de encapsulamento PDIP [3] está disposta na Figura 13.

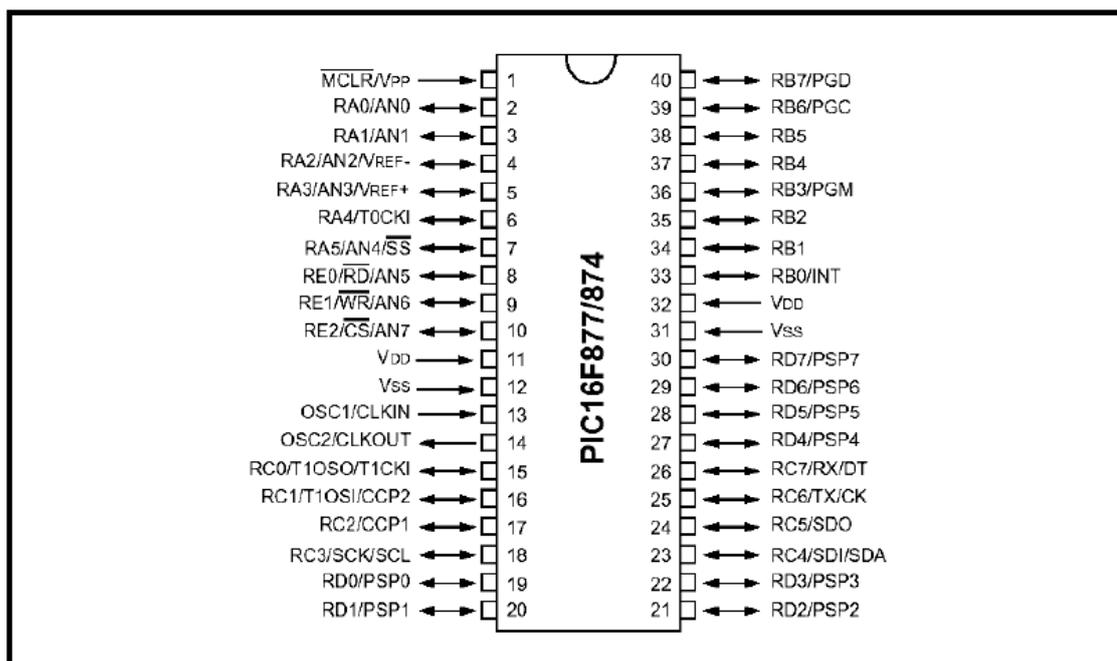


Figura 13: Pinagem do microcontrolador PIC 16F877.

### 2.3.2 Display LCD

O controlador HD47780 existente no circuito do LCD é extremamente funcional na aplicação de controle e geração de caracteres. A adaptação deste controlador é feita diretamente no barramento de dados do microcontrolador e supre a utilização das portas de dados garantindo a comunicação entre os dois dispositivos de forma eficaz.

O circuito integrado controlador é capaz de gerar 208 diferentes tipos de caracteres padrão conforme a Tabela ASCII [4] e possui capacidade de se inicializar automaticamente na detecção de tensão de alimentação. O conjunto do circuito controlador e dispositivo LCD possui capacidade de mostrar 32 (16x2) caracteres visíveis simultaneamente durante o funcionamento.

Para funcionamento, primeiro precisamos configurá-lo, ou seja, precisamos dizer ao display como vamos transferir os dados para ele (4 ou 8 bits), quantas linhas vamos utilizar, se a mensagem deve ficar fixa ou dever ou rolar, se a escrita será da direita para a esquerda ou o contrário, ou seja, todas estas informações são necessárias antes de escrever qualquer mensagem, e estas informações são escritas em um programa de computador e são enviadas para o display através do Microcontrolador.

A Tabela 1 descreve cada pino do controlador do display para conexão deste ao circuito.

Tabela 1: Utilização da pinagem do controlador no circuito.

Pino	Função	Descrição
1	Alimentação	Terra ou GND
2	Alimentação	Vcc ou +5V
3	V0	Tensão para ajuste de contraste
4	RS Seleção	1 - Dado, 0 - Instrução
5	R/W Seleção	1 – Leitura, 0 - Escrita
6	E Chip select	1 – Habilita, 0 Desabilita
7	B0 LSB	Barramento de Dados
8	B1	
9	B2	
10	B3	
11	B4	
12	B5	
13	B6	
14	B7 MSB	
15	A	Ânodo p/ LED backlight
16	K	Cátodo p/ LED backlight

### 2.3.3 Conversão A/D

Depois que sinais de tensão e corrente são condicionados como já foi descrito, eles chegam às entradas analógicas utilizadas para a conversão. A amplitude dos sinais estão contidos na faixa de 0 a 5V.

Antes de serem manipulados em um sistema digital, os sinais analógicos precisam ser convertidos em digital através de um circuito chamado conversor A/D. O valor de cada ponto capturado pelo conversor é armazenado em uma variável de comprimento fixo, se o conversor

é de 8 bits, por exemplo, isso significa que pode armazenar valores entre 0 e 255 ( $2^8 = 256$  valores). Se for de 10 bits, como é o caso, poderá armazenar valores de 0 a 1023.

O conversor interno do MCU é capaz de converter um sinal apenas por vez, sendo assim, para realizar a conversão do sinal de tensão e corrente simultaneamente foi preciso aproximar da seguinte forma, coleta-se um valor de corrente, em seguida um de tensão e novamente um de corrente, daí é tirado a média aritmética entre os valores de corrente e esse valor é utilizado como o correspondente no tempo do de tensão. Este procedimento é utilizado para cada amostra e é mostrada na Figura 14.

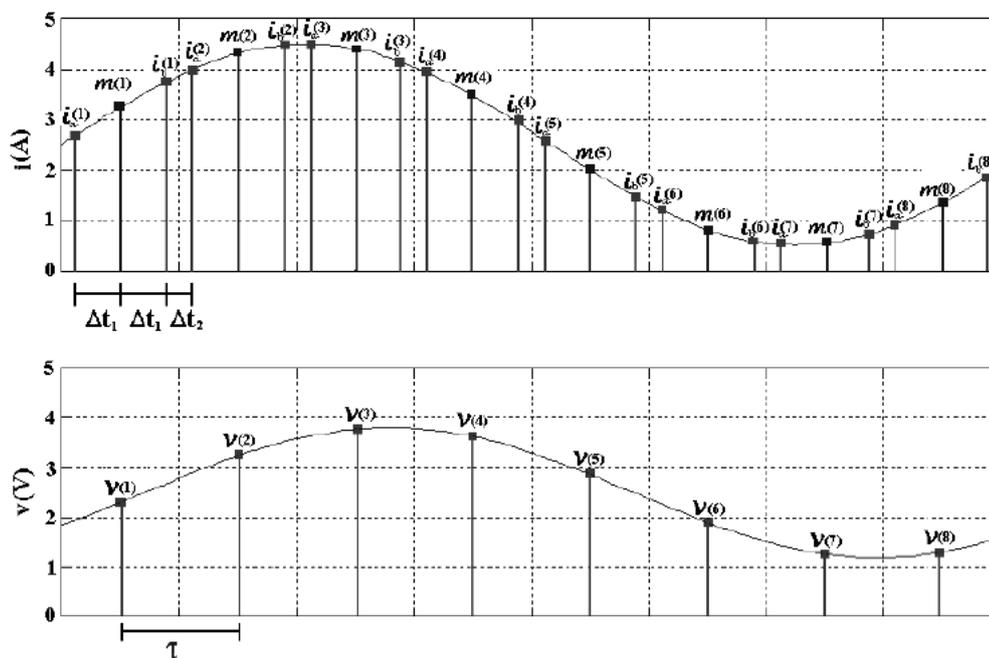


Figura 14: Conversão dos sinais de corrente e tensão.

Note que é aproximado o valor da corrente, que na figura corresponde ao valor de  $m$ . Dessa forma, os sinais são convertidos para valores digitais, onde serão usados para calcular os valores das grandezas elétricas [14].

### 2.3.4 Medição do Fator de Potência

Para a medição do fator de potência foi utilizado a função *TIMER* do microcontrolador e a técnica de detecção de zero. A lógica funciona da seguinte maneira.

- Detecção de zero da onda de corrente: Quando é feita uma medida de corrente no valor zero o *TIMER* é disparado.
- Detecção de zero da onda de tensão: Quando é feita uma medida de tensão no valor zero o *TIMER* é encerrado.

A partir do método acima é possível determinar o tempo de defasagem entre as ondas de tensão e de corrente e conseqüentemente a partir das equações (9) e (7) determinar o ângulo de defasagem entre as duas ondas e o fator de potência respectivamente.

### 2.3.5 Análise do Processo de Tarifação

Com todos os valores convertidos e medidos pelo PIC o programa executa os cálculos de potência, energia e tarifação, utilizando as equações descritas na seção (1.3). No entanto, a tarifa de energia varia com a localização (normalmente de um estado para outro), o tipo de consumidor (industrial, residencial, etc.). Assim foi necessário o desenvolvimento de uma interface para interação do usuário com o instrumento de medida, essa interação foi feita através de 4 botões. Estes botões e suas funções estão dispostos na Tabela 2.

Tabela 2: Descrição das funções dos botões de interface do dispositivo.

Nome	Descrição	Função
B1	Botão SET	Botão de incremento de valores
B2	Botão DEC	Botão de decremento de valores
B3	Botão OK	Botão de seleção da opção OK
B4	Botão Cancela	Botão de seleção da opção Cancela

Primeiramente, ao ser ligado o dispositivo, o display mostra a seguinte mensagem para o usuário “manter o valor”, caso o usuário aperte B3 o calculo da tarifação será realizado utilizando o valor da tarifa armazenado na memória. Se o usuário apertar B4 o display pedirá para o usuário colocar o valor da tarifa, assim o display mostra a mensagem “primeiro dígito” então o usuário pode aumentar ou diminuir o valor do primeiro dígito apertando B1 ou B2 respectivamente. Ao selecionar o valor desejado o usuário novamente aperta B3, esse procedimento segue até o terceiro dígito. Por fim o display mostra a seguinte mensagem “Zerar medidor”, caso o usuário aperte B3 o dispositivo começa a tarifação do zero, caso aperte o botão B4 ele começa a tarifar a partir do valor da ultima medida feita pelo dispositivo, neste momento também se inicia a saída de dados em tempo real, os quais são mostrados no display. Um esquema com essa lógica está representado na Figura 15.

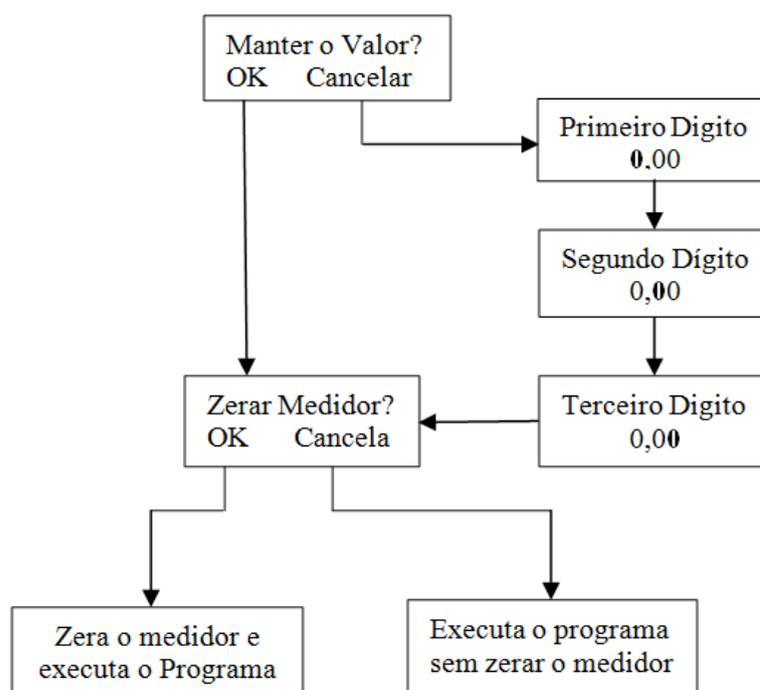


Figura 15: Fluxograma.

### 2.3.6 Esquema Geral do Protótipo

Finalmente depois de detalhar com detalhes os módulos que compõe o dispositivo, é possível entender como estes se relacionam entre si. A Figura 16 mostra o esquema completo de ligação dos circuitos do TDE.

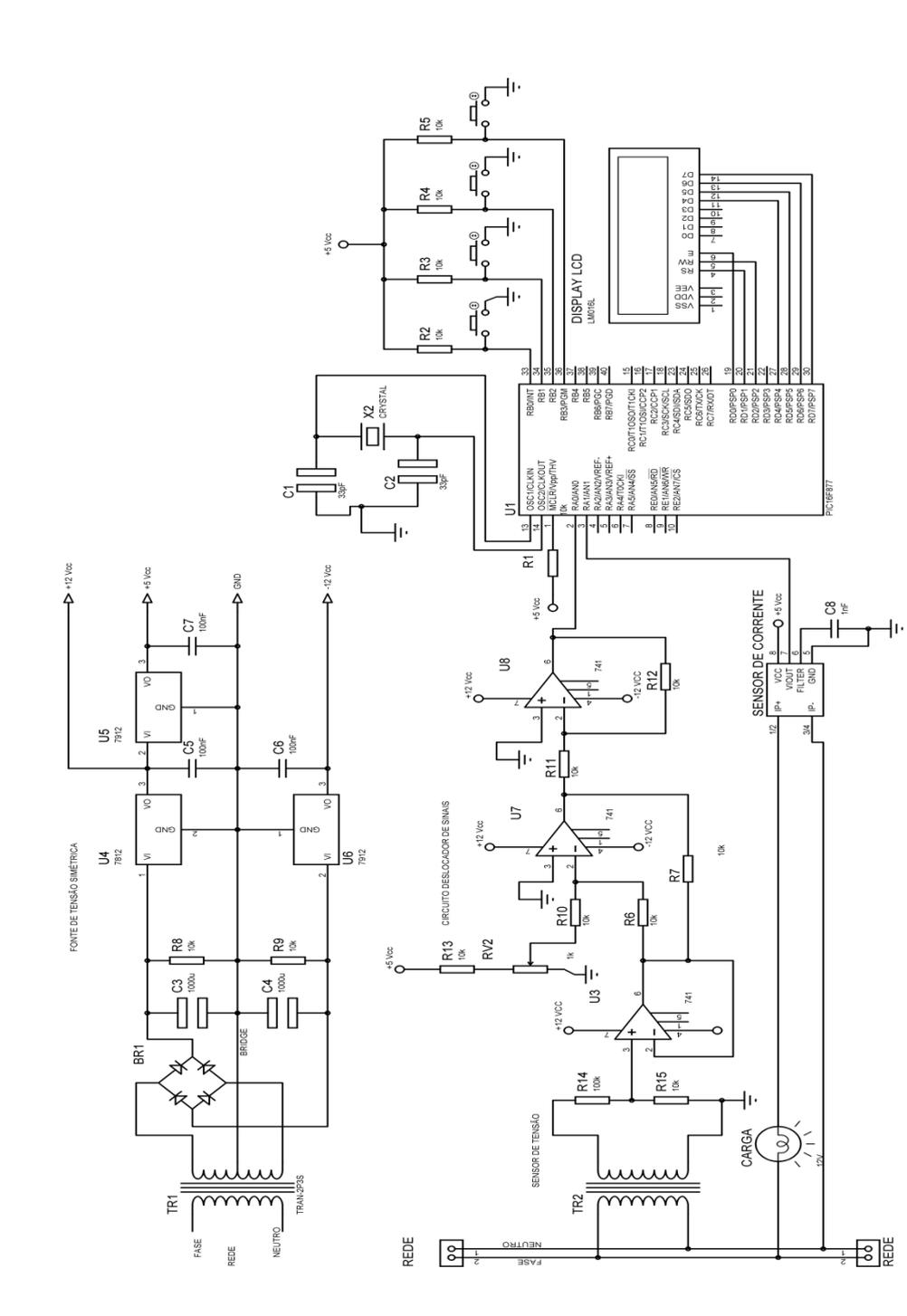


Figura 16: Esquemático completo do dispositivo.

### 3 *Resultados e Discussões*

Todos os testes realizados com o protótipo tiveram como base uma carga resistiva, para que fosse possível simplificar a análise do funcionamento do dispositivo, podendo de forma fácil realizar ajustes, modificações e, contudo chegar aos resultados esperados para esta fase do projeto.

Os testes aqui demonstrados foram feitos no NIAS (Núcleo Interdisciplinar de Análise de Sinais) do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Viçosa. A instrumentação básica é composta por equipamentos tais como, osciloscópio digital, voltímetro digital, amperímetro digital, lâmpadas de teste de 150W/220V (valores nominais), computadores, entre outros instrumentos.

#### 3.1 *Ensaio para obtenção dos resultados*

Para verificar o funcionamento e a precisão do TDE foi realizado dois ensaios, primeiramente foi medido a tarifação de uma lâmpada de 150W/220V gasta durante 1 hora de uso. Em seguida repetimos este procedimento para três lâmpadas ligadas em paralelo. Para verificar se o valor medido pelo tarifador estava correto, utilizamos dois multímetros para medir corrente e tensão sobre a carga, de posse dos valores medidos pelos multímetros foi realizado o cálculo da tarifação analiticamente. A Figura 17 mostra o esquema utilizado para a realização deste ensaio.

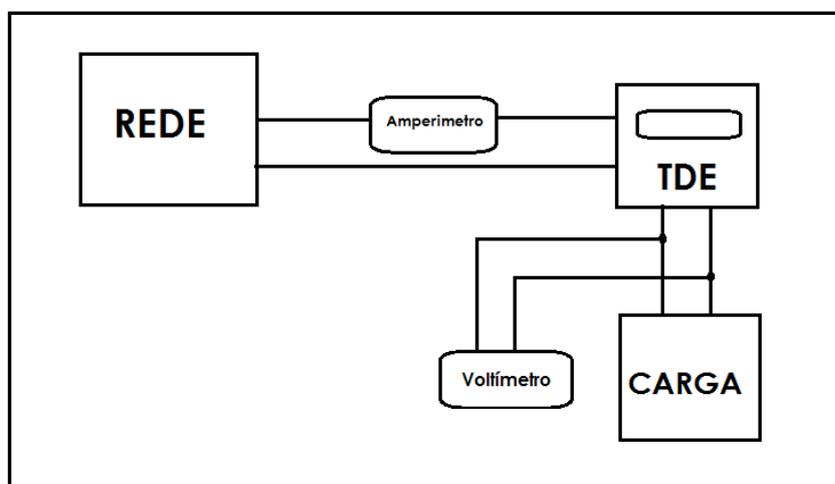


Figura 17: Montagem para realização dos ensaios.

### 3.2 Discussão dos Resultados

Finalmente os valores calculados e medidos foram comparados e assim foi calculado o erro referente a cada ensaio. Estes resultados estão representados na tabela abaixo.

Tabela 3: Resultados dos ensaios.

Ensaio	$V_{RMS}(V)$	$I_{RMS}(A)$	E(kWh)	Tarifação Calculada	Tarifação Medida	Erro (%)
1 Lâmpada	127,6	1,196	0,1526	0,09614	0,10328	7,43%
3 Lâmpadas	127,6	3,577	0,4564	0,28875	0,30890	6,98%
6 Lâmpadas	127,6	7,162	0,9138	0,57569	0,61409	6,67%

Como podemos observar para uma carga maior o erro diminuiu, isso ocorre porque a tensão de saída do sensor hall possui uma amplitude muito baixa, o que atrapalha a precisão do sensor. Uma alternativa para resolver é amplificar o sinal de tensão na saída do sensor hall, no entanto seria necessário implementar um sistema de escala no dispositivo, já que para valores grandes de corrente o sinal amplificado irá exceder o limite de 5V na porta A/D do PIC.

## **4 Conclusões**

Neste projeto foi possível à implementação de um protótipo capaz de mensurar em tempo real o valor monetário consumido por uma ou mais carga, tendo assim o consumidor, a possibilidade de acompanhar seus gastos com mais eficiência e clareza. Como foi observado o dispositivo apresenta uma precisão aceitável se tratando de um protótipo destinado a uso doméstico. Também pode ser observado que estes resultados podem ser melhorados através de um sistema de escala automático, no entanto isso elevaria o custo final do dispositivo. Outro fator que ainda pode ser melhorado é a construção do módulo de alimentação interna ao dispositivo aumentando sua portabilidade. Para que este dispositivos possa ser lançado como produto ainda existem etapas a ser cumpridas, como por exemplo os ajustes funcionais e a padronização do dispositivos de acordo com normas técnicas, além de etapas burocráticas referentes a patente e entre outros.

## *Referências Bibliográficas*

- [1] Falcão, P. D. (2013). Redes Elétricas Inteligentes. Acesso em 12 de Agosto de 2013, disponível em [http://www.paginasustentavel.com.br/index.php?option=com\\_content&view=article&id=76:redes-eletricas-inteligentes-smart-grid&catid=8:artigos&Itemid=17](http://www.paginasustentavel.com.br/index.php?option=com_content&view=article&id=76:redes-eletricas-inteligentes-smart-grid&catid=8:artigos&Itemid=17)
- [2] Lima, E. S. (2007). Protótipo de Tarifador Digital de Energia Elétrica. Monografia, Universidade Católica de Goiás, Engenharia da Computação, Goiânia.
- [3] Mateus, V. (2001). Fator de Potência. Cuiabá.
- [4] David E. Johnson, J. L. (1994). Fundamentos de Análise de Circuitos Elétricos (4 ed.). LTC.
- [5] Wikipédia. (Julho de 2013). Fator de potência. Acesso em 12 de Agosto de 2013, disponível em [http://pt.wikipedia.org/wiki/Fator\\_de\\_pot%C3%Aancia](http://pt.wikipedia.org/wiki/Fator_de_pot%C3%Aancia)
- [6] ANEEL. (12 de Junho de 2012). Nota Técnica nº 0083/2012-SRD/ANEEL. Acesso em 15 de Agosto de 2013, disponível em [http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/audiencia/arquivo/2012/065/documento/nota\\_tecnica\\_0083\\_daniel\\_dir.pdf](http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/audiencia/arquivo/2012/065/documento/nota_tecnica_0083_daniel_dir.pdf)
- [7] Donato, E. B. (2006). Wattímetro digital de baixo custo. Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Engenharia Elétrica, Viçosa.
- [8] WIKIPÉDIA. (s.d.). Tarifa de energia elétrica. Acesso em 12 de Agosto de 2013, disponível em [http://pt.wikipedia.org/wiki/Tarifa\\_de\\_energia\\_el%C3%A9trica](http://pt.wikipedia.org/wiki/Tarifa_de_energia_el%C3%A9trica)
- [9] PORTAL Tributário. (s.d.). PIS e COFINS - Aspectos gerais. Acesso em 05 de Agosto de 2013, disponível em [http://www.portaltributario.com.br/guia/pis\\_cofins.html](http://www.portaltributario.com.br/guia/pis_cofins.html)
- [10] ANEEL. (s.d.). Por dentro da conta de luz da CEMIG D. Acesso em 15 de Agosto de 2013, disponível em [http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/Cartilha\\_Cemig-2.pdf](http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/Cartilha_Cemig-2.pdf)
- [11] Wendling, M. (2009). CI Reguladores de Tensão. UNESP, Guaratinguetá.
- [12] Fitzgerald, A. E., Jr, C. K., & Umans, S. D. (2006). Máquinas Elétricas (6 ed.). Bookman.
- [13] ALEGRO MicroSystems. (s.d.). ACS712ELCTR-20A-T. Acesso em 2012, disponível em <http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/168328/ALLEGRO/ACS712ELCTR-20A-T.html>
- [14] Nascimento, T. (2009). Sistema de Monitoramento Remoto de Grandezas Elétricas Via Rede Elétrica. Monografia, Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Engenharia Elétrica, Viçosa.