UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL

MARCELO SARAIVA LINHARES

DESENVOLVIMENTO DE MULTIMEDIDOR ELETRÔNICO DE ENERGIA ELÉTRICA

CAXIAS DO SUL

2015

MARCELO SARAIVA LINHARES

DESENVOLVIMENTO DE MULTIMEDIDOR ELETRÔNICO DE ENERGIA ELÉTRICA

Relatório apresentado como requisito para aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso do Curso de Engenharia de Controle e Automação da Universidade de Caxias do Sul.

Orientador Prof. Ms. Ricardo Leal Costi

CAXIAS DO SUL

2015

MARCELO SARAIVA LINHARES

DESENVOLVIMENTO DE MULTIMEDIDOR ELETRÔNICO DE ENERGIA ELÉTRICA

Relatório apresentado como requisito para aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso do Curso de Engenharia de Controle e Automação da Universidade de Caxias do Sul.

Orientador Prof. Ms. Ricardo Leal Costi

Aprovado em 10/12/2015

Banca Examinadora

_____

Prof. Ms. Ricardo Leal Costi Orientador
Universidade de Caxias do Sul - UCS

_____

Prof. Ms. Andréa Cantarelli Morales
Universidade de Caxias do Sul - UCS

_____

Prof. Dr. Diorge Alex Báo Zambra
Universidade de Caxias do Sul – UCS

AGRADECIMENTOS

À minha esposa pelo apoio e paciência durante a execução deste trabalho.

Ao orientador Professor Ms. Ricardo Leal Costi, por suas valiosas contribuições e sugestões no âmbito deste trabalho, bem como por sua disponibilidade. Ao amigo Guilherme Argenta pelo auxílio na montagem da placa de circuito impresso.

RESUMO

O alto custo da energia elétrica força os consumidores, em especial as indústrias, a buscar sistemas de gestão energética a fim de analisar onde e quanta energia está sendo consumida e evitar seu desperdício. Para auxiliar na análise de consumo de energia elétrica o presente trabalho apresenta o projeto, desenvolvimento e execução de testes para um medidor de energia elétrica de medição indireta, eletrônico, multigrandezas, parametrizável, baseado em microcontrolador e capaz de armazenar as medidas efetuadas em um cartão de memória para análises posteriores. O trabalho contempla toda a definição dos componentes a serem utilizados no *hardware*, bem como o desenvolvimento do *firmware* utilizado pelo dispositivo. Na execução do projeto foi utilizado microcontrolador para o tratamento das medidas efetuadas por um módulo de potência. O referido módulo é responsável pela leitura dos sinais de corrente e potencial provenientes do circuito a ser medido. Foi desenvolvida e confeccionada placa de circuito impresso dedicada ao medidor de energia elétrica, sendo que seus testes foram efetuados nesta placa. Os resultados obtidos mostraram-se satisfatórios, onde os dados foram coletados e o dispositivo será enviado para um laboratório acreditado pelo INMETRO para análise e certificação.

Palavras-chave: Energia Elétrica. Medição. Microcontrolador.

ABSTRACT

The high cost of electricity forces consumers, particularly industries, to increasingly seek energy management systems to analyze where and how much energy is being consumed and avoid wastage. To help analyzing electricity consumption, this paper presents the project, developing and execution of tests of an indirect measurement, electronic, greatness, adjustable electric meter based on a microcontroller and capable of storing the readings on a memory card for posterior analysis. The paper contemplates all the components to be used in the hardware as well as the development of the firmware used by the device. In the project a microcontroller execution was used to treat the measurements performed by a power module, which is responsible for reading the potential and current signals from the circuit being measured. A printed circuit board was made and developed dedicated to the electricity meter and its tests have been made on this board. The results were satisfactory, where the data was collected and the device will be sent to a laboratory accredited by INMETRO for analysis and certification.

Keywords: Electric Power. Measurement. Microcontroller.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Valores do MWh para produção industrial 13
Figura 2 - Desperdício de energia por tipo de consumidor em R$ bilhões 14
Figura 3 - Ondas de corrente contínua e corrente alternada 19
Figura 4 - Triângulo das potências 20
Figura 5 - Medidor eletromecânico 24
Figura 6 - Multimedidor eletrônico 25
Figura 7 - Esquema de ligação do transformador de potencial 26
Figura 8 - Transformador de potencial 27
Figura 9 - Esquema de ligação do transformador de corrente 28
Figura 10 – Transformadores de corrente 29
Figura 11 - Esquema de ligação do sensor *Hall* 30
Figura 12 - Sensor *Hall* para medição de corrente 31
Figura 13 - Bobinas medidor monofásico 32
Figura 14 - Bobinas medidor bifásico 32
Figura 15 - Diagrama fasorial de uma medição a dois elementos 33
Figura 16 - Bobinas medidor trifásico 34
Figura 17 - Diagrama fasorial de uma medição a três elementos 34
Figura 18 - Medição indireta de baixa tensão a três elementos 35
Figura 19 - Medição indireta de alta tensão a três elementos 36
Figura 20 - Comunicação *SPI* 39
Figura 21 - Barramento I^2C 40
Figura 22 - Diagrama de blocos 44
Figura 23 - Sensor Fluke i30 45
Figura 24 - Sensor Minipa CA-1000 45
Figura 25 - *Software* de controle da fonte gerador de sinais 46
Figura 26 - Fonte trifásica geradora dos sinais 46
Figura 27 - Montagem em laboratório 46
Figura 28 - Corrente e tensão em fase 47
Figura 29 - Corrente e tensão a 30° 47
Figura 30 - Corrente e tensão a 60° 47
Figura 31 - Microcontrolador PIC18F4620 49
Figura 32 - Cálculo da incerteza total do medidor 51

Figura 33 - RTC - DS1307.....53
Figura 34 - Fluxograma do firmware 55
Figura 35 - Arquivos de dados do cartão SD.....56
Figura 36 – Arquivo de parâmetros.....57
Figura 37 – Menu de parâmetros 58
Figura 38 - Simulação de *firmware* e *hardware*.....59
Figura 39 – Projeto x PCI 61
Figura 40 - Placa e caixa.....61
Figura 41 - Gravação de *Firmware*.....63
Figura 42 – Ensaio parcial das grandezas de influência 64
Figura 43 – Tela do medidor 65
Figura 44 – Menu de parâmetros 65
Figura 45 – Medição de energia ativa inicial 65
Figura 46 – Medição de energia ativa no ensaio.....65
Figura 47 – Corrente eficaz.....65
Figura 48 – Tensão eficaz.....65
Figura 49 – Arquivo gerado pelo medidor 66
Figura 50 – Gráfico da tensão eficaz.....67

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Pinagem comunicação *SPI* 38
Tabela 2 – Comparativo entre sensores por efeito *Hall* 44
Tabela 3 - Características PIC18F4620 48
Tabela 4 - Características módulo de medição de potência.....50

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABESCO	Associação Brasileira das Empresas de Serviços de Conservação de Energia
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CI	Circuito Integrado
CSV	*Comma Separated Values*
FAT16	*File Allocation Table 16 bits*
FIRJAN	Federação das Indústrias do Estado do Rio de Janeiro
I^2C	*Inter Integrated Circuit*
ICSP	*In Circuit Serial Programming*
KSPS	*Kilo Samples Per Second*
kWh	Quilo Watt hora
MWh	Mega Watt hora
OEE	*Overall Equipment Effectiveness*
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
PCI	Placa de circuito impresso
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional
RTC	*Real Time Clock*
SD	*Secure Digital*
SMD	*Surface Mount Device*
SPI	*Serial Peripheral Interface*
TC	Transformador de Corrente
TP	Transformador de Potencial
TQFP	*Thin Quad Flat Package*
USART	*Universal Synchronous/Asynchronous Receiver Transmitter*

SUMÁRIO

1 CARACTERIZAÇÃO GERAL DO TRABALHO 13
1.1 JUSTIFICATIVA DO TRABALHO 13
1.2 OBJETIVOS 15
1.2.1 Objetivo Geral 15
1.2.2 Objetivos Específicos 15
1.3 LIMITAÇÕES DO TRABALHO 16

2 DESENVOLVIMENTO 17
2.1 VISÃO GERAL DO TRABALHO 17
2.2 ENERGIA ELÉTRICA 18
2.3 GRANDEZAS ELÉTRICAS BÁSICAS 18
2.3.1 Corrente 18
2.3.2 Tensão 19
2.3.3 Potência 19
2.4 MEDIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA 23
2.4.1 Transformadores para instrumentos 25
2.4.1.1 Transformador de potencial (TP) 25
2.4.1.2 Transformador de corrente (TC) 27
2.4.2 Sensor de efeito *Hall* 29
2.4.3 Especificação do sistema de medição 31
2.5 COMUNICAÇÃO DE DADOS EM MICROCONTROLADORES 37
2.5.1 Comunicação Serial 37
2.5.2 *SPI* 38
2.5.3 I^2C 40
2.5.4 Comunicação Assíncrona – USART 41

3 MEDIDOR DE ENERGIA ELÉTRICA 43
3.1 AQUISIÇÃO DE SINAIS 44
3.2 MICROCONTROLADOR 48
3.3 MÓDULO PARA MEDIÇÃO DE POTÊNCIA 49
3.4 GRAVAÇÃO DOS DADOS E BASE DE TEMPO 52
3.5 FIRMWARE 55

3.6 SIMULAÇÃO 59
3.7 CONFECÇÃO DA PLACA DE CIRCUITO IMPRESSO.....60
3.7.1 Alimentação e Gravação do *Firmware*.....60
3.7.2 Projeto e layout da placa 60

4 RESULTADOS.....63

5 CONCLUSÃO 69

REFERÊNCIAS.....71

ANEXO A – TABELA 1 PRODIST.....75

APÊNDICE A – CIRCUITO PARA MONTAGEM DA PLACA 77

1 CARACTERIZAÇÃO GERAL DO TRABALHO

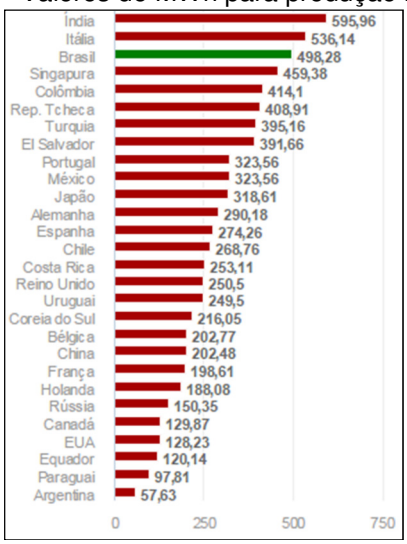
Apresentação da justificativa para realização do presente trabalho.

1.1 JUSTIFICATIVA DO TRABALHO

Insumo básico à produção industrial, a energia elétrica demanda métodos de gestão e análise de consumo extremamente importantes devido ao seu elevado custo. A indústria nacional é responsável por 35,1 % do consumo de energia do país, sendo ela um dos custos mais elevados para a produção industrial (SOARES, TOSTES e SOARES, 2014).

Em março de 2015 a Federação das Indústrias do Estado do Rio de Janeiro (FIRJAN) publicou pesquisa onde informava que o custo médio da energia elétrica subiu 23,4 % para a indústria brasileira, alcançando o valor de R$ 498,30 por MWh, este aumento colocou o Brasil na terceira colocação do ranking dos países com maior custo de energia elétrica para o setor industrial (ECONOMIA, 2015). A Figura 1 apresenta um quadro comparativo dos valores de energia para a produção industrial de diversos países.

Figura 1 – Valores do MWh para produção industrial

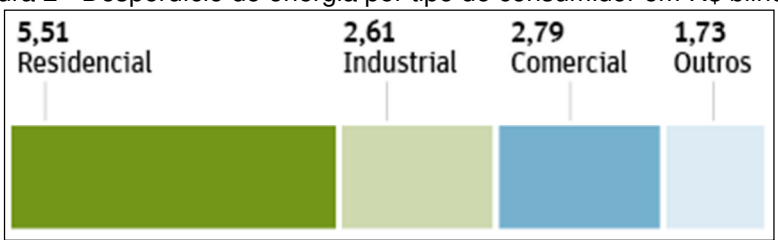


Fonte: ECONOMIA (2015)

Aliado ao alto custo existe o desperdício de energia, que é aquela energia consumida, entretanto, não transformada em trabalho. Levantamentos efetuados pela Associação Brasileira das Empresas de Serviços de Conservação de Energia

(ABESCO) apontam que de toda a energia consumida no Brasil no ano de 2014, aproximadamente R$ 12,64 bilhões foi desperdiçada, o que equivale a 10 % da energia consumida, sendo uma boa parte deste desperdício atribuído aos clientes industriais (CUNHA, 2015). Na Figura 2 é apresentada a distribuição do desperdício por classe de consumidor.

Figura 2 - Desperdício de energia por tipo de consumidor em R$ bilhões



Fonte: CUNHA (2015)

Os dois fatores mencionados vem impondo à indústria nacional a necessidade da implantação dos mais variados métodos de gestão energética. Estes métodos têm como principais características definir e encontrar variáveis de consumo que possam ser controladas além de gerar indicadores e recursos que demonstrem eficiência dos fatores que afetam diretamente o consumo e uso final da energia. Sistemas de gestão energética possuem quatro atividades distintas, que são: avaliação, emissão de diagnóstico, tomada de decisão e realização das ações (SAMED, KATAYAMA, *et al.*, 2012).

Sistemas de gestão energética também podem ser utilizados para o controle de produção. Nestes sistemas as grandezas elétricas medidas auxiliam nas tomadas de decisão quanto à tarifa de energia que a indústria deve contratar, horários mais adequados para a operação de máquinas, comparação entre a produtividade de máquinas tendo como parâmetro comparativo a energia consumida entre outras.

Neste trabalho é proposto um sistema para aquisição e tratamento dos sinais de tensão e corrente de máquinas elétricas utilizadas nos mais variados setores da indústria, com o intuito de levantar os parâmetros de energia consumida por determinado processo. Os dados coletados serão transmitidos a um software supervisório, onde poderá ser acompanhado em tempo real o desempenho da máquina avaliada.

1.2 OBJETIVOS

Neste item são abordados e discutidos os objetivos gerais e específicos deste trabalho.

1.2.1 Objetivo Geral

O presente trabalho tem como objetivo geral o desenvolvimento de um medidor de energia que fará o registro de algumas grandezas elétricas, como: energia ativa, energia reativa, energia aparente, fator de potência, valores de tensão e corrente eficazes e alguma outra grandeza elétrica que seja julgada necessária durante a execução do trabalho.

O medidor de energia deverá transmitir seus dados a um sistema de controle de produção. O controlador irá utilizar os dados recebidos para avaliar a produtividade da máquina levando em consideração a energia consumida para a realização do processo, os dados enviados serão gravados em memória não volátil para análise posterior.

1.2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos do trabalho são elencados a seguir:

a) Definir o microcontrolador a ser utilizado, método de aquisição dos valores de corrente e tensão e circuito de tratamento dos sinais elétricos;
b) Desenvolver o firmware para o microcontrolador;
c) Projetar o esquemático e a placa de circuito impresso;
d) Realizar simulações do firmware e da placa;
e) Testar dispositivo em bancada para a validação da montagem;
f) Testar comunicação com sistema supervisório;
g) Ajustes.

1.3 LIMITAÇÕES DO TRABALHO

O presente trabalho será restrito ao desenvolvimento do medidor de energia elétrica, isto é, desenvolvimento de hardware, firmware e comunicação com o controlador de produção. O software supervisório utilizado será o mesmo empregado no controlador de produção. Da mesma forma, eventuais necessidades de alteração no controlador de produção a fim de interligá-lo ao medidor de energia, não farão parte do escopo deste projeto.

2 DESENVOLVIMENTO

Neste capítulo é discutido o embasamento teórico utilizado no desenvolvimento deste trabalho.

2.1 VISÃO GERAL DO TRABALHO

As grandezas elétricas medidas serão transmitidas ao controlador de produção, o qual utilizará estes dados para verificar qual o consumo de energia elétrica de uma determinada máquina ou setor de produção e utilizar esta informação para verificar sua produtividade e identificar possíveis desperdícios de energia.

O medidor de energia elétrica será baseado em microcontrolador. Este microcontrolador terá a função de tratar os dados recebidos e efetuar a comunicação com o controlador de produção e o software supervisório. O sistema de controle de produção possui um software supervisório utilizado para obter as informações em tempo real, entretanto o medidor será dotado, de um cartão de memória que irá gravar os dados registrados a fim de que os mesmos sejam acessados posteriormente.

As medições serão efetuadas, por um circuito integrado específico para a medição de energia elétrica. Após efetuar a leitura dos sinais de corrente e tensão o circuito integrado informa ao microcontrolador, através de comunicação *Serial Peripheral Interface* (*SPI)*, as grandezas elétricas medidas. Para as leituras de corrente será necessário definir qual tipo de sensor de corrente irá ser utilizado, que pode ser do tipo transformador de corrente ou sensor *Hall*. Esta mesma comunicação *SPI* é utilizada para a comunicação entre microcontrolador e cartão de memória. Com intuito de auxiliar na geração de gráficos e relatórios do consumo de energia, o medidor de energia elétrica possuirá base de tempo real do tipo *Real Time Clock (RTC)*, o circuito integrado responsável por esta informação passará ao microcontrolador a data e horário dos eventos através de comunicação *Inter Integrated Circuit (I^2C).*

Toda transmissão de dados entre o medidor de energia e o controlador de produção será efetuada de acordo com o protocolo de comunicação do controlador.

Sendo assim, o medidor necessitará ser concebido de acordo com o protocolo já existente.

2.2 ENERGIA ELÉTRICA

A eletricidade é uma forma de energia que pode ser imediatamente e eficientemente transformada em outras formas de energias. A energia elétrica pode ser gerada das mais diversas formas, aproveitando-se as quedas d'água para geração hidráulica ou até mesmo minas carboníferas na geração termoelétrica. A conveniência do emprego da energia elétrica está no fato de sua facilidade de aplicação nos mais numerosos e variados fins, como em uso doméstico, público, comercial e industrial (HADDAD, 2004). No Sistema Internacional de Medidas a unidade de energia é o Joule (J), entretanto é usual utilizar tanto para medição quanto para faturamento de energia elétrica o quilowatt-hora, sendo assim este trabalho utilizará o kWh e seus múltiplos e submúltiplos.

2.3 GRANDEZAS ELÉTRICAS BÁSICAS

2.3.1 Corrente

A corrente elétrica é basicamente o movimento ordenado das cargas elétricas. A intensidade da corrente elétrica é dada pelo quociente da quantidade de cargas que se deslocam no tempo. A Equação 1 apresenta o cálculo da intensidade de corrente elétrica.

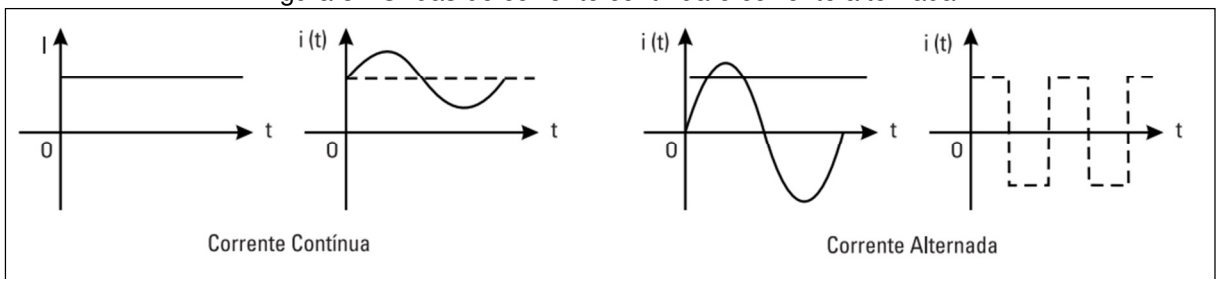
$$I = \frac{dq}{dt} \tag{1}$$

Onde:

I – intensidade de corrente elétrica.
dq – variação da quantidade de carga elétrica em Coulomb.
dt – variação do tempo em segundos.

A unidade de medida da intensidade de corrente elétrica no Sistema Internacional de Medidas é o ampère (A). A corrente pode se apresentar de duas formas distintas, uma delas é a corrente alternada, aquela que varia sua polaridade no tempo, obrigatoriamente passando por um valor igual a zero, enquanto que a outra é a corrente contínua, que se trata da corrente que flui em somente um sentido no tempo (HADDAD, 2004). Na Figura 3 são apresentados exemplos de ondas de corrente alternada e contínua.

Figura 3 - Ondas de corrente contínua e corrente alternada



Fonte: HADDAD (2004)

2.3.2 Tensão

Trata-se por tensão elétrica a diferença de potencial elétrico entre dois pontos. Esta diferença de potenciais é a responsável pela movimentação de cargas elétricas gerando assim a circulação da corrente elétrica. No Sistema Internacional de Medidas a unidade da tensão elétrica é o volt (V).

2.3.3 Potência

Potência elétrica é a razão da energia elétrica pelo tempo, sua unidade no Sistema Internacional de Medidas é o watt (W). A Equação 2 demonstra o cálculo da potência.

$$P = \frac{dW}{dt} \tag{2}$$

Onde:

P – potência elétrica.

dW – energia elétrica.

dt – variação do tempo.

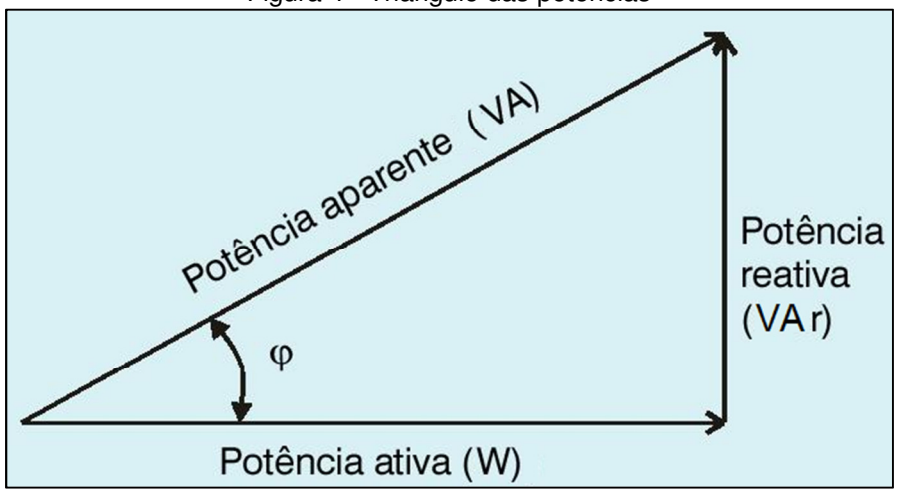
A potência também pode ser encontrada a partir do produto da tensão pela corrente. Medições de energia são efetuadas a partir da potência medida num intervalo de tempo, em geral esse intervalo de tempo é de uma hora.

Existem três tipos de potência elétrica, e estas formam o triângulo das potências, são elas:

- Potência Ativa: quantidade de energia elétrica solicitada por unidade de tempo, expressa em quilowatts (kW) (ANEEL, 2010).
- Potência Reativa: definida como a raiz quadrada da diferença dos quadrados da potência aparente e da potência ativa, expressa em volt-ampères reativos (VAR) e seus múltiplos (ANEEL, 2010). É a energia elétrica responsável pela criação dos campos elétricos e magnéticos de um sistema de corrente alternada, porém não produz trabalho (HADDAD, 2004).
- Potência Aparente: corresponde à soma fasorial das potências ativa e reativa, é expressa em volt-ampère (VA).

O triângulo das potências é apresentado na Figura 4.

Figura 4 - Triângulo das potências



Fonte: HADDAD (2004)

Por se tratar de um triângulo retângulo os valores das potências são facilmente encontrados com cálculos trigonométricos simples.

A potência aparente é calculada a partir dos valores eficazes de tensão e corrente sendo representada pela letra S, ela representa a hipotenusa do triângulo. O cálculo da potência aparente é expressa na Equação 3.

$$S = V.I \tag{3}$$

Representando o cateto adjacente do triângulo, a potência ativa é calculada a partir da Equação 4.

$$P = V.I.\cos\varphi \tag{4}$$

A potência ativa também pode ser calculada como a média da potência instantânea. Este cálculo é apresentado na Equação 5.

$$P = \frac{1}{T}\int_0^T p_{inst}.dt \tag{5}$$

Expressa pela letra Q a potência reativa é a parcela de energia que é trocada reversivelmente entre fonte e carga (HADDAD, 2004). A Equação 6 demonstra o cálculo desta potência.

$$Q = V.I.sen\varphi \tag{6}$$

Diferente das potências ativa e aparente, a potência reativa pode assumir valores positivos e negativos, sendo este valor negativo quando a carga tiver característica reativa-capacitiva, e será positivo quando a característica for reativa-indutiva.

Para medições de energia em sistemas trifásicos equilibrados com condutor neutro é válido lembrar a relação entre as tensões de linha e de fase conforme mostrado na Equação 7.

$$V_{linha} = V_{fase}.\sqrt{3} \tag{7}$$

Desta forma, as expressões para o cálculo das potências aparente, ativa e reativa para sistemas trifásicos equilibrados com condutor neutro estão representadas respectivamente nas Equações 8, 9 e 10.

$$S = \sqrt{3}.V_{linha}.I_{linha} \quad (8)$$

$$P = \sqrt{3}.V_{linha}.I_{linha}.\cos\varphi \quad (9)$$

$$P = \sqrt{3}.V_{linha}.I_{linha}.sen\varphi \quad (10)$$

O ângulo formado na junção da potência ativa com a potência aparente é identificado pela letra grega φ (phi) e o seu cosseno representa o fator de potência. O fator de potência pode ser definido como sendo a relação entre as potências ativa e aparente. O valor do fator de potência está intimamente ligado à eficiência da utilização da energia elétrica. Pode-se afirmar que uma instalação que possui um fator de potência com valor próximo a 1, tem por sua vez uma alta eficiência (HADDAD, 2004). A Equação 11 demonstra o cálculo do fator de potência.

$$\cos\varphi = \frac{1}{\sqrt{1+\left(\frac{Q}{P}\right)^2}} \quad (11)$$

Onde:

$\cos\varphi$ – fator de potência.
Q – potência reativa.
P – potência ativa.

A legislação nacional determina que o fator de potência tenha valor o mais aproximado de 1, neste sentido, a potência total do circuito deixaria de ser a aparente e seria somente a potência ativa, sendo assim, haveria somente a potência que produz trabalho. O menor valor para fator de potência admissível é 0,92. Valores menores que este gerarão faturamento de excedente reativo ao consumidor, havendo um incremento no valor da conta de energia (ANEEL, 2010).

Existem várias razões para a origem de um fator de potência baixo, dentre elas pode se destacar:

a) Nível de tensão acima da nominal;
b) Motores elétricos operando a vazio ou superdimensionados;
c) Transformadores operando a vazio ou superdimensionados;
d) Reatores de baixo fator de potência para sistemas de iluminação;
e) Fornos de indução ou a arco voltaico.

As consequências do baixo fator de potência podem ser descritas como:

a) Acréscimo na fatura de energia devido à cobrança de excedente reativo;
b) Aumento das perdas elétricas devido ao efeito Joule em função da corrente criada pela parcela reativa da energia;
c) Limitação do carregamento de transformadores;
d) Necessidade de condutores com secção transversal maiores.

2.4 MEDIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

A Resolução Normativa ANEEL 414 de 2010 define como medição o processo realizado por equipamento que possibilite a quantificação e o registro de grandezas elétricas associadas à geração ou consumo de energia elétrica, assim como à potência ativa ou reativa (ANEEL, 2010). Na prática a medição de energia elétrica serve para a concessionária poder faturar o consumo de energia de seus clientes.

Os medidores de energia mais utilizados no mercado nacional são os do tipo eletromecânicos (MÍNGUEZ, 2007). Estes medidores se baseiam na interação entre os campos magnéticos das bobinas de corrente e tensão para proporcionar o movimento do disco. Devido às suas características construtivas os medidores eletromecânicos medem somente uma das energias, sendo assim, existem medidores específicos para energias ativa e reativa, que são as energias faturadas pelas concessionárias. A energia aparente não é faturada. A Figura 5 apresenta um exemplo de medidor de energia ativa eletromecânico monofásico.

Figura 5 - Medidor eletromecânico

Fonte: NANSEN (2015)

Mesmo os medidores de energia eletromecânicos demonstrando-se uma tecnologia bastante robusta e confiável, os medidores de energia eletrônicos conseguem oferecer maior exatidão e informações mais detalhadas acerca do consumo de energia.

Medidores de energia eletrônicos possuem a vantagem de associar diversas funções de medição no mesmo componente, isto é, em um medidor pode-se medir energia ativa, reativa, demanda de energia, tensão, corrente e outras grandezas elétricas, a estes modelos é dado o nome de multimedidor.

As medições eletrônicas de energia possuem a possibilidade de monitoramento à distância, o que proporciona sua leitura remota e integração com sistemas de gestão de energia. Medidores eletrônicos em geral são dotados de uma memória de massa onde são registradas todas as grandezas elétricas por ele medidas. Os dados gravados nestes medidores podem servir para o gerenciamento de manutenção, melhorias e auxílio na tomada de decisões quanto a possíveis intervenções da concessionária no circuito onde o consumidor está ligado. A Figura 6 apresenta um modelo de multimedidor eletrônico de energia que acumula diversas funções de medição no mesmo equipamento.

Figura 6 - Multimedidor eletrônico

Fonte: SIEMENS (2015)

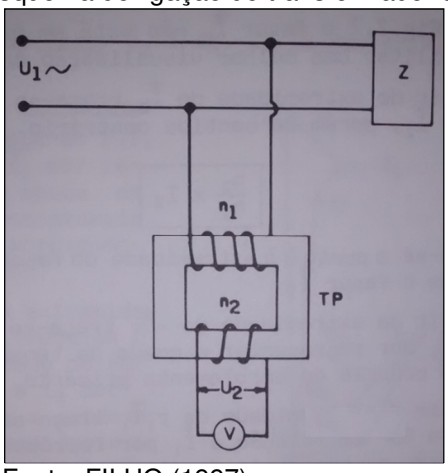
2.4.1 Transformadores para instrumentos

Os transformadores para instrumentos são equipamentos elétricos projetados especificamente para adequarem os módulos de corrente e tensão a níveis mensuráveis para os dispositivos de medição, proteção e comando, sem alterar a natureza dos sinais, como sua frequência, ângulo de fase e forma de onda (FILHO, 1997)

2.4.1.1 Transformador de potencial (TP)

Consiste geralmente de um enrolamento primário e um enrolamento secundário. Seu enrolamento secundário é conectado às bobinas de potencial dos medidores, enquanto sua bobina primária é ligada em paralelo ao circuito que se deseja medir a tensão. Basicamente se comporta como um transformador rebaixador de tensão. A Figura 7 representa esquematicamente o transformador de potencial.

Figura 7 - Esquema de ligação do transformador de potencial



Fonte: FILHO (1997)

Transformadores de potencial são construídos para uma tensão secundária nominal de 115 V, este é um padrão, sendo assim, os fabricantes de medidores, relés de proteção e outros dispositivos que utilizam TP irão fabricar suas bobinas de potencial para este nível de tensão. Nas placas de características dos transformadores de potencial são expressos os valores de tensão primária e secundária, como seguem alguns exemplos: 13800 V / 115 V, 34500 V / 115 V, 230 kV / 115 V. A relação de transformação de um TP refere-se a razão da tensão primária pela tensão secundária. Tendo como exemplo o último valor citado, onde o primário é ligado em 230 kV, tem-se uma relação de 2000, o que significa dizer que a cada 1 V medido no secundário do TP, haverá 2000 V no primário do mesmo. A Equação 12 apresenta o cálculo da relação de transformação para os transformadores de potencial.

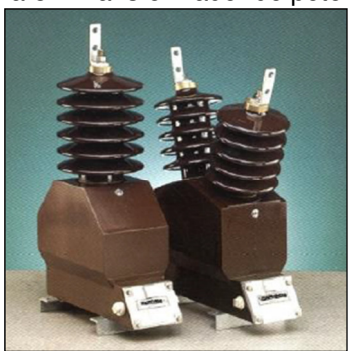
$$RTP = \frac{V_1}{115V} \tag{12}$$

Onde:

V_1 – tensão do primário.

A Figura 8 mostra dois modelos de transformadores de potencial, um dos modelos apresenta apenas um isolador de alta tensão no seu primário, o que significa que o mesmo deverá ser conectado entre uma fase e o terra, enquanto que o outro modelo apresenta dois isoladores de alta tensão, o que permite que o mesmo seja conectado tanto entre fase e terra como entre duas fases.

Figura 8 - Transformador de potencial



Fonte: BELCHIOR (2014)

A NBR 6855/2009 regulamenta algumas características dos transformadores de potencial (BELCHIOR, 2014):

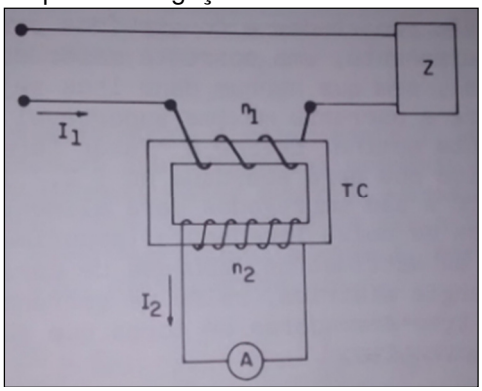
a) Tensão primária nominal e relação nominal;
b) Nível de isolamento;
c) Frequência nominal;
d) Carga nominal;
e) Classe de exatidão;
f) Potência térmica nominal.

Todas as características são extremamente importantes para a definição do TP a ser utilizado, entretanto será comentada somente a classe de exatidão, pois, esta é intimamente ligada ao tipo de circuito onde será inserido o TP. A classe de exatidão é o erro máximo, expresso em porcentagem, que poderá ser causado pelo TP aos instrumentos a ele conectados. Transformadores de potencial utilizados em circuitos de medição devem pertencer à classe de exatidão de 0,6 % (BELCHIOR, 2014).

2.4.1.2 Transformador de corrente (TC)

É o transformador de instrumentos responsável por reduzir a corrente do circuito a ser medido. Seu enrolamento primário é conectado em série com o circuito onde a corrente elétrica é mais elevada, enquanto seu enrolamento secundário é ligado às bobinas de corrente dos medidores. A Figura 9 demonstra o esquema de ligação de um transformador de corrente.

Figura 9 - Esquema de ligação do transformador de corrente



Fonte: FILHO (1997)

De forma análoga ao transformador de potencial, o transformador de corrente possui um valor de corrente secundária padronizada, o valor mais comum para correntes secundárias é 5 A, entretanto alguns fabricantes já possuem TC com correntes secundárias de 1 A. Considerando o primeiro caso, corrente secundária de 5 A, a relação de transformação do TC será a razão da corrente primária pela corrente secundária, desta forma para um TC com corrente primária de 1000 A, a relação de transformação será 200, isto significa dizer que para cada 1 A medido no secundário do TC haverá 200 A no primário. A Equação 13 demonstra o cálculo da relação de transformação para os transformadores de corrente.

$$RTC = \frac{I_1}{5A} \tag{13}$$

Onde:

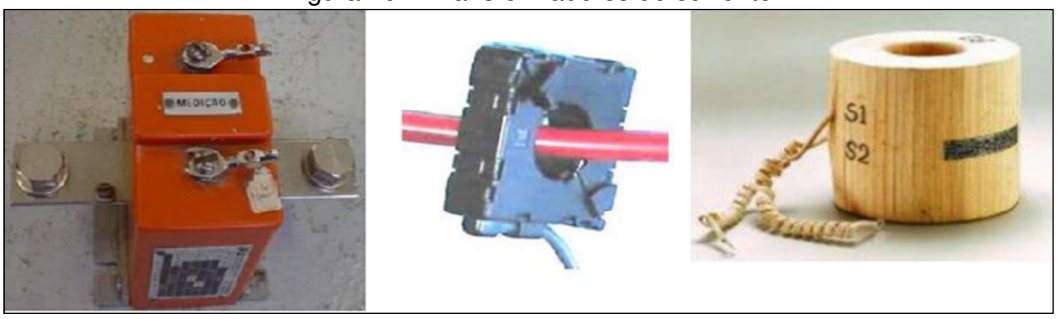
I_1 – corrente do primário.

A NBR 6856/1981 regulamenta, para os transformadores de corrente, as mesmas características que a NBR 6855/2009 regulamenta para os transformadores de potencial, a única diferença é que onde uma refere-se à tensão primária nominal e relação nominal a outra tem corrente primária e relação nominal.

Transformadores de corrente podem apresentar diferentes características construtivas, em relação à forma como a corrente primária circula por ele. Existem TC's que o primário é uma barra, sendo assim, considera-se que possui apenas uma espira neste enrolamento. O TC pode ser do tipo janela, onde o condutor cruza pelo

núcleo onde está enrolado o secundário do mesmo. Este modelo possui a vantagem de não necessitar interromper o circuito. Existem ainda os transformadores de corrente de bucha, estes instrumentos são instalados geralmente em transformadores de grandes potências e reatores, e são utilizados para as proteções próprias dos mesmos (BELCHIOR, 2014). A Figura 10 apresenta os três modelos de TC citados.

Figura 10 – Transformadores de corrente



Fonte: BELCHIOR (2014)

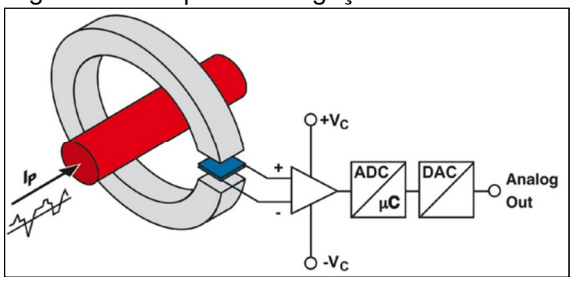
Semelhante aos transformadores de potencial, os transformadores de corrente utilizados para fins de medição de energia devem pertencer à uma classe de exatidão mínima, neste caso, 0,6 % (BELCHIOR, 2014).

2.4.2 Sensor de efeito *Hall*

Existe outra maneira de medir correntes elétricas altas sem a utilização de transformadores de corrente, trata-se da utilização de sensores de corrente por efeito *Hall*.

Sensores que atuam baseados no princípio do efeito *Hall*, basicamente fornecem uma tensão devido à interação de um campo magnético e uma corrente elétrica. A tensão gerada é de valor muito baixo, sendo assim, necessita de um circuito eletrônico a fim de condicionar o sinal para valores facilmente mensuráveis (HONEYWELL, 2015). Devido à sua característica, os sensores de corrente por efeito *Hall*, terão como entrada, o que se pode equivaler à corrente primária, a corrente do circuito a ser medido, e a sua saída não será mais uma corrente de menor módulo como no transformador de corrente, mas será um valor de tensão proporcional à corrente de entrada. A Figura 11 demonstra o esquema de ligação de sensor do tipo *Hall* para medição de corrente.

Figura 11 - Esquema de ligação do sensor *Hall*



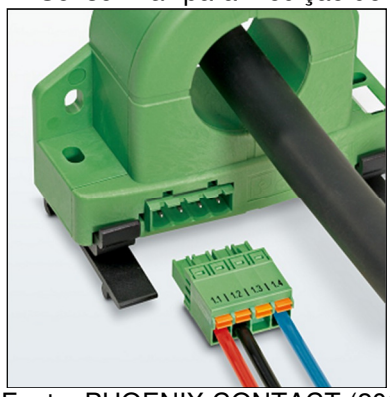
Fonte: PHOENIX CONTACT (2015)

As razões para utilização dos sensores de efeito *Hall* levam em consideração a aplicação, custo, desempenho e disponibilidade. Podem-se citar como vantagens da utilização de sensores de efeito *Hall* as seguintes características (HONEYWELL, 2015):

a) Longa vida útil estimada em 30 bilhões de operações em média;
b) Operações em altas frequências, podendo ser utilizados com frequências maiores que 100 kHz;
c) Ampla faixa de temperatura -40 ºC a +150 ºC;
d) Operação altamente repetível.

Devido às suas características construtivas, os sensores por efeito *Hall* apresentam uma grande vantagem sobre os transformadores de corrente, que é a possibilidade da medição de correntes contínuas. A interação de campos magnéticos que gera a tensão de saída de um sensor por efeito *Hall* independe se o sinal a ser medido é contínuo ou alternado. Entretanto, os transformadores de corrente dependem da variação do fluxo magnético gerado pela corrente alternada para gerar uma corrente na sua saída, o que significa dizer que, quando uma corrente contínua circula pelo enrolamento primário de um transformador de corrente, não haverá corrente alguma em seu enrolamento secundário. Sensores de corrente por efeito *Hall* possuem ainda a facilidade de serem construídos de forma semelhante aos transformadores de corrente do tipo janela, sendo assim, não necessitam interromper o circuito para efetuar a medição da corrente. Um modelo de sensor *Hall* é apresentado na Figura 12.

Figura 12 - Sensor *Hall* para medição de corrente



Fonte: PHOENIX CONTACT (2015)

2.4.3 Especificação do sistema de medição

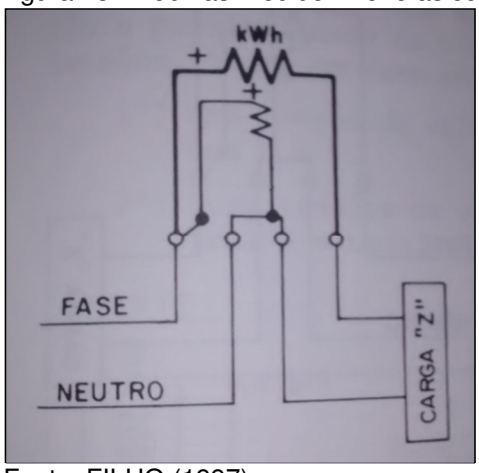
Toda medição de energia necessita a definição de qual maneira os sinais de corrente e tensão serão informados ao medidor de energia. Basicamente define-se se a medição será direta, indireta de baixa tensão ou indireta de alta tensão.

Medições diretas caracterizam-se pela conexão do medidor diretamente ao circuito onde será efetuada a medição, isto significa que a corrente drenada pelo circuito circulará integralmente pela bobina de corrente do medidor, enquanto a bobina de tensão é ligada diretamente em paralelo com o circuito. Este tipo de medição é utilizado somente para circuitos de baixa tensão, visto que o medidor necessitaria ter isolação para suportar as tensões do circuito e com correntes relativamente baixas onde não necessitam transformadores de corrente.

As medições diretas podem ser a dois, três ou quatros fios. Medições a dois fios são também chamadas de medição de um elemento, por consequência as medições a três fios são chamadas de medição a dois elementos, enquanto que as medições a quatro fios são chamadas de três elementos.

Medições a dois fios são utilizadas em circuitos monofásicos. Nestes circuitos a bobina de corrente do medidor é conectada ao condutor fase, enquanto que o condutor neutro é somente conectado à bobina de potencial. A Figura 13 demonstra as ligações das bobinas de corrente e tensão de um medidor monofásico.

Figura 13 - Bobinas medidor monofásico

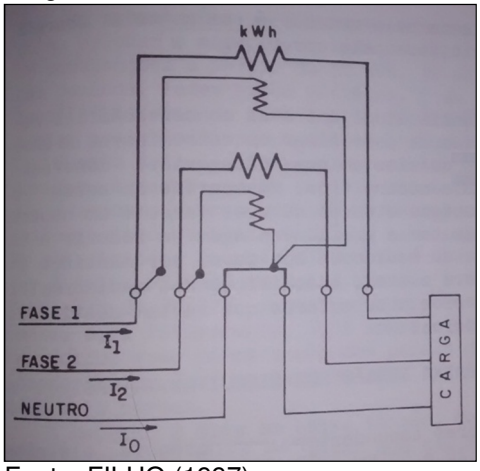


Fonte: FILHO (1997)

Nota-se que a bobina de potencial está conectada na entrada do medidor de energia, desta forma a corrente consumida por ela, mesmo sendo bastante baixa, não passará pela bobina de corrente do medidor. Esta conexão é feita desta forma para que a energia consumida pelo medidor não seja registrada por ele (FILHO, 1997).

Por sua vez, as medições a três fios são utilizadas para medir a energia de circuitos compostos por dois condutores fase e um condutor neutro. Na medição de dois elementos existem duas bobinas de corrente e duas bobinas de tensão. De forma análoga à medição de um elemento, as bobinas de tensão são conectadas aos condutores fase, enquanto que o condutor neutro é somente conectado às bobinas de potencial. A Figura 14 demonstra as conexões das bobinas de potencial e corrente de um medidor de dois elementos.

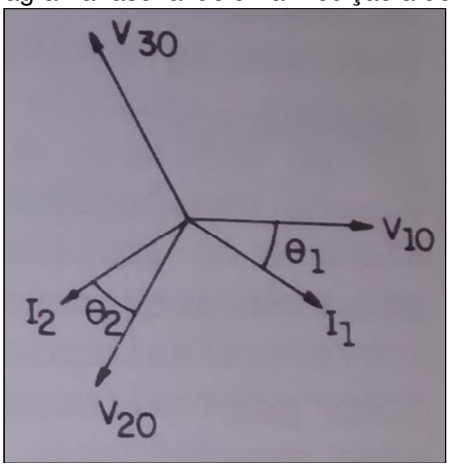
Figura 14 - Bobinas medidor bifásico



Fonte: FILHO (1997)

Na Figura 15 é apresentado o diagrama fasorial para uma medição de dois elementos e carga indutiva, uma vez que as correntes encontram-se atrasadas em relação às tensões. Pode-se notar que apenas duas fases do sistema trifásico possuem corrente associadas. Na figura o ângulo formado entre as correntes e as tensões é chamado de theta (θ). Este ângulo expressa o fator de potência da carga e é equivalente ao ângulo phi (φ) apresentado na Figura 4.

Figura 15 - Diagrama fasorial de uma medição a dois elementos



Fonte: FILHO(1997)

A energia ativa total indicada neste tipo de medição é demonstrada na Equação 14.

$$W = V_{10}.I_1.\cos\theta_1 + V_{20}.I_2.\cos\theta_2 \qquad (14)$$

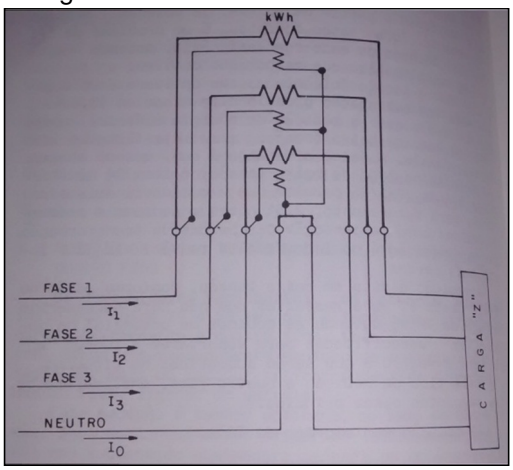
Onde:

W – energia ativa medida.
V_{10} – tensão entre a fase 1 e o neutro.
I_1 – corrente da fase 1.
$\cos\varphi_1$ – fator de potência da fase 1.
V_{20} – tensão entre a fase 2 e o neutro.
I_2 – corrente da fase 2.
$\cos\varphi_2$ – fator de potência da fase 2.

As medições a três elementos operam da mesma maneira que as medições apresentadas anteriormente, a diferença está na quantidade de fases que compõem

o circuito onde será medida a energia. A Figura 16 apresenta o esquema de ligação de medição a quatro fios.

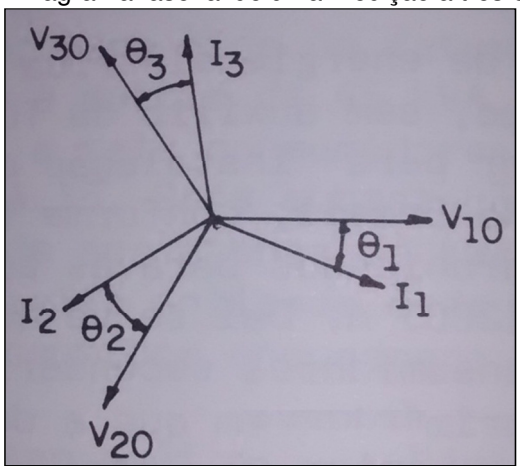
Figura 16 - Bobinas medidor trifásico



Fonte: FILHO (1997)

Para a medição a três elementos os fasores de tensão e corrente são apresentados na Figura 17. Novamente pode-se verificar a existência do ângulo theta (θ) entre as tensões e correntes. Para cargas equilibradas tem-se o módulo das correntes e ângulos entre correntes e tensões iguais. Diferente da medição a três fios, a medição a quatro fios possui corrente em todas as três fases que estão conectadas ao circuito.

Figura 17 - Diagrama fasorial de uma medição a três elementos



Fonte: FILHO (1997)

O cálculo da energia ativa para uma medição a três elementos é dado pela Equação 15.

$$W = V_{10}.I_1.\cos\theta_1 + V_{20}.I_2.\cos\theta_2 + V_{30}.I_3.\cos\theta_3 \quad (15)$$

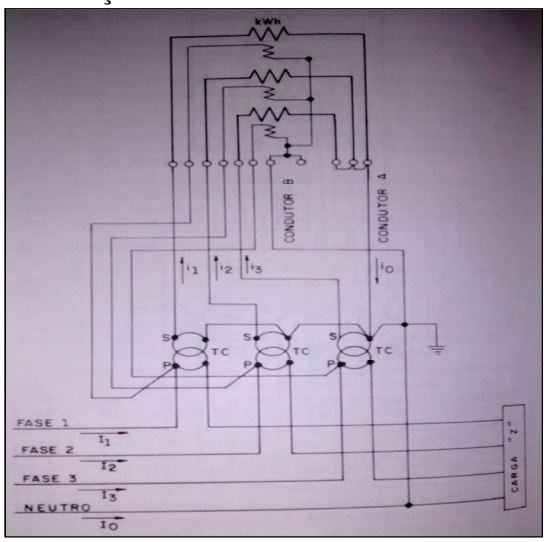
As equações apresentadas são para o cálculo da energia ativa, nota-se que para se efetuar o cálculo da energia reativa deve-se utilizar o seno do ângulo theta (θ) ao invés de seu cosseno, como está nas equações.

Para circuitos com cargas equilibradas pode-se medir a energia em somente uma das fases e multiplicar por três, visto que a energia será igual em cada uma das fases.

Existem variações das medições de um, dois e três elementos que são as medições indiretas. Neste tipo de medição podem ser utilizados somente transformadores de corrente ou transformadores de corrente e potencial em conjunto. Para medições em baixa tensão, com cargas elevadas as quais operam com elevadas correntes, utiliza-se medições indiretas de baixa tensão somente com a instalação do transformador de corrente em série com a carga. Os limites de carga para utilização de medição indireta de baixa tensão são definidos pela concessionária distribuidora de energia.

As bobinas de potencial são conectadas antes dos transformadores de corrente, a fim de não medir a corrente consumida pelas referidas bobinas (FILHO, 1997). A Figura 18 apresenta o circuito para medição a três elementos e utilização de transformadores de corrente.

Figura 18 - Medição indireta de baixa tensão a três elementos



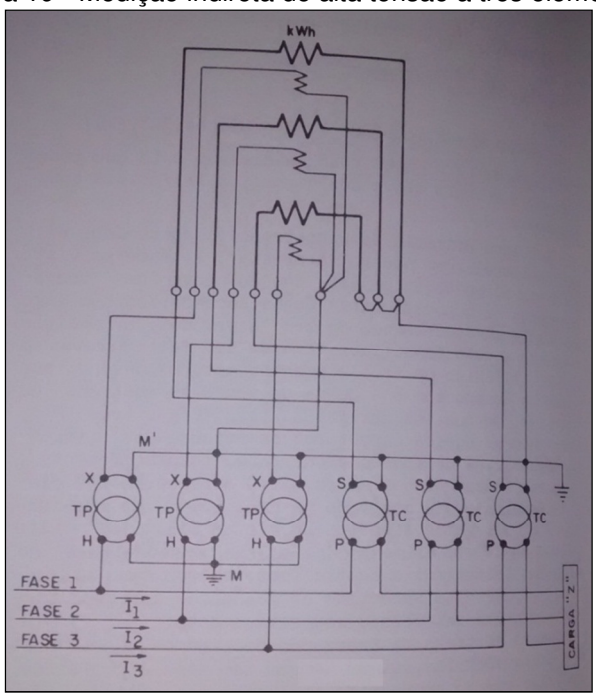
Fonte: FILHO (1997)

Para este tipo de medição é necessário levar em conta a relação de transformação do transformador de corrente. Como a corrente que circulará pela bobina do medidor será menor em módulo a energia medida será menor na mesma proporção, sendo assim, a energia medida necessitará ser multiplicada pela relação do transformador de corrente, demonstrada na Equação 13, a fim de se obter o valor real de energia. A Equação 16 apresenta o cálculo da energia ativa para uma medição a três elementos utilizando transformador de corrente.

$$W = \left(V_{10}.I_1.\cos\theta_1 + V_{20}.I_2.\cos\theta_2 + V_{30}.I_3.\cos\theta_3\right) \cdot RTC \tag{16}$$

Quando existe a necessidade de medir-se a energia que está sendo consumida em mais de um transformador de alta tensão, se utiliza o método de medição indireta de alta tensão, que significa medir as correntes e tensões primárias do circuito, tensões que geralmente são iguais ou superiores a 13,8 kV. Neste tipo de medição são usados tanto transformadores de corrente quanto transformadores de potencial (FILHO, 1997). A Figura 19 mostra o circuito de uma medição indireta de alta tensão com utilização de três transformadores de potencial e três transformadores de corrente.

Figura 19 - Medição indireta de alta tensão a três elementos



Fonte: FILHO (1997)

De forma análoga à medição indireta de baixa tensão também é necessário utilizar as relações de transformação para o cálculo da energia real consumida. Porém, nesta medição utiliza-se além da relação de transformação do transformador de corrente a relação do transformador de potencial, apresentada na Equação 12. A Equação 17 demonstra o cálculo da energia ativa para uma medição indireta de alta tensão a três elementos.

$$W = \left(V_{10}.I_1.\cos\theta_1 + V_{20}.I_2.\cos\theta_2 + V_{30}.I_3.\cos\theta_3\right) \cdot RTC \cdot RTP \quad (17)$$

À multiplicação da RTC pela RTP é dado o nome de Relação Total de Transformação (RTT).

Medidores de energia eletrônicos não possuem bobinas de corrente e tensão, mas sim sensores e circuitos integrados que fazem estas funções, os quais podem ser analisados da mesma forma que as bobinas de medidores eletromecânicos.

2.5 COMUNICAÇÃO DE DADOS EM MICROCONTROLADORES

A comunicação de dados trata da transmissão de sinais através de um meio físico, de uma forma confiável e eficiente (CERUTTI, 2005).

2.5.1 Comunicação Serial

Chama-se comunicação serial ao modo de transmissão de dados que ocorre quando os bits que representam cada caractere são enviados em sequência, isto é, um de cada vez pelo mesmo meio físico (FMR, 2005).

Transmissões seriais podem ser efetuadas de duas formas:

a) Síncrona: neste tipo de comunicação existe a necessidade de um sincronismo externo, o qual informará o sinal de *clock* tanto para o transmissor quanto para o receptor.

b) Assíncrona: na transmissão assíncrona não existe sincronização entre o receptor e o transmissor, sendo assim, é necessária a utilização de bits especiais para identificar o início e fim de cada caractere.

Quanto ao sentido da transmissão de dados, os sistemas de comunicação serial ainda podem ser do tipo *half-duplex* e *full-duplex*. No primeiro modo as transmissões podem ser efetuadas nos dois sentidos, sendo assim, um dispositivo age tanto como receptor e transmissor. Porém, sendo ora em um sentido e ora no outro, este modo não permite a transmissão nos dois sentidos ao mesmo tempo. O segundo modo permite a transmissão e recepção simultâneas, desta forma um dispositivo irá atuar como transmissor e receptor concomitantemente (FMR, 2005).

São exemplos de métodos de comunicação serial, comumente implementadas em microcontroladores:

a) *SPI*;
b) I^2C;
c) USART.

2.5.2 *SPI*

Comunicação *SPI* refere-se a um barramento de comunicação serial comumente utilizado para transmissão de dados entre microcontroladores em modo síncrono *full-duplex*. O barramento *SPI* opera em uma arquitetura Mestre-Escravo, onde o mestre controla todas as comunicações e o *clock* (SACCO, 2014).

Uma característica da comunicação *SPI* é que toda transmissão de dados se dá em ambas as direções, o que significa dizer que todo bit enviado pelo Mestre ao Escravo, trará um bit do Escravo para o Mestre. Os pinos utilizados para a comunicação *SPI* são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Pinagem comunicação *SPI*

(continua)

NOME PADRÃO	SIGNIFICADO	NOME ALTERNATIVO
MOSI	*Master Output Slave Input*	SDO, DO, SO
MISO	*Master Input Slave Output*	SDI, DI, SI

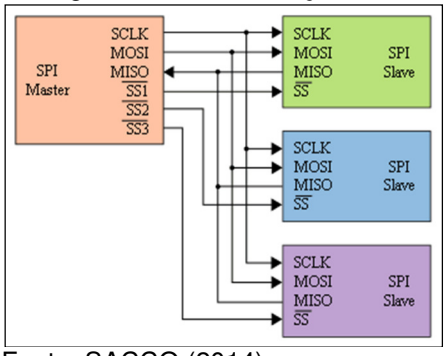
(conclusão)

NOME PADRÃO	SIGNIFICADO	NOME ALTERNATIVO
SCLK	*Serial Clock*	SCK, CLK
SS	*Slave Select*	CS, nSS, nCS

Fonte: SACCO (2014)

O dispositivo Mestre seleciona o Escravo, com quem irá efetuar a transmissão de dados, através do pino SS. Cada dispositivo Escravo possui uma conexão de SS única com o mestre, as demais conexões são comuns a todos os dispositivos Escravos. Para se comunicar com um dispositivo Escravo, o seu Mestre irá colocar o pino referente ao SS do referido Escravo em nível lógico 0, esta ação habilita a comunicação entre os dispositivos. A Figura 20 demonstra a conexão de um barramento *SPI*, de um Mestre e três Escravos.

Figura 20 - Comunicação *SPI*



Fonte: SACCO (2014)

Cita-se como vantagens e desvantagens do uso da comunicação *SPI*:

Vantagens

a) É mais rápida que uma comunicação serial assíncrona;
b) Um dispositivo Mestre pode suportar vários dispositivos Escravos;
c) Permite comunicação full-duplex.

Desvantagens

a) Exige mais conexões que outros métodos de comunicação;
b) Toda comunicação deve partir do Mestre, dispositivos Escravos não podem trocar dados;
c) A falha do dispositivo Mestre irá comprometer todo o sistema de comunicação.

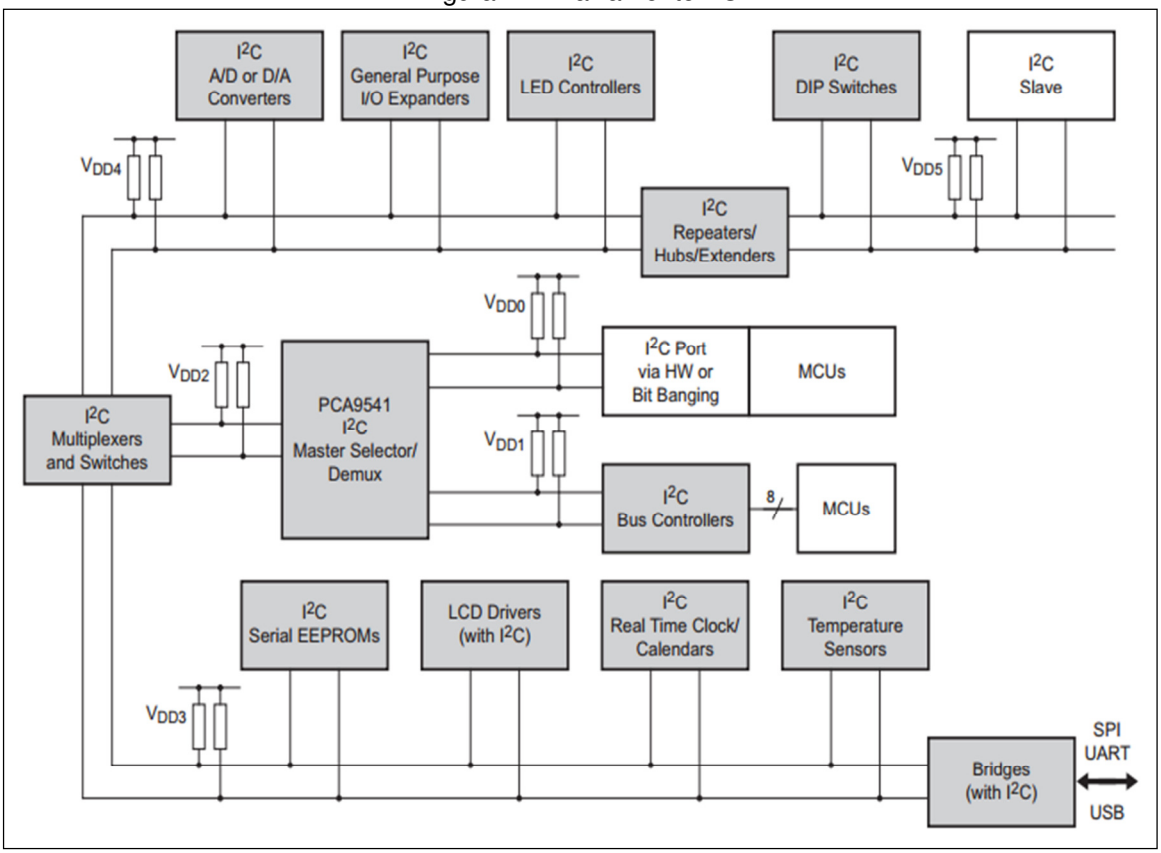
2.5.3 I²C

Originalmente desenvolvido pela Philips no ano de 1982, o I²C trata-se de um barramento de comunicação serial em modo síncrono *half-duplex*. Neste tipo de comunicação são utilizadas apenas duas conexões, SDA – linha de dados e SCL – linha de *clock* (NXP, 2014). De forma análoga à comunicação *SPI* o I²C também opera em uma arquitetura Mestre-Escravo.

Em um barramento I²C cada Escravo possui um endereço de 7, 8 ou 10 bits, este endereçamento é o que permite a utilização de apenas uma linha de dados. Toda transmissão de dado efetuada no barramento I²C informa primeiramente o endereço do dispositivo que deverá receber a mensagem (NXP, 2014).

O I²C é um padrão de comunicação de coletor aberto, sendo assim, necessita de resistores de *pull-up* para seu funcionamento. A Figura 21 apresenta um exemplo de barramento I²C.

Figura 21 - Barramento I²C



Fonte: NXP (2014)

Podem ser citadas como vantagens e desvantagens do uso da comunicação I^2C:

Vantagens

a) Não necessita qualquer interface externa adicional;
b) Consumo de corrente extremamente baixo;
c) Alta imunidade a ruídos.

Desvantagens

a) Não permite comunicação full-duplex;
b) Devido ao modo de comunicação Mestre-Escravo, o barramento não pode ser compartilhado por diversos dispositivos simultâneos.

2.5.4 Comunicação Assíncrona – USART

O módulo USART de um microcontrolador permite configurá-lo em modo de comunicação síncrona e assíncrona. Quando configurado em modo assíncrono, traz a vantagem de poder operar em modo *full-duplex.*

Trata-se por transmissão de dados assíncrona quando não se estabelece, no dispositivo receptor, sincronização relativa ao dispositivo emissor, sendo assim, as mensagens transmitidas necessitam bits especiais que indicam o início e o fim de cada transmissão (SOUZA, 2005).

Quando o modo de comunicação assíncrona é implementado em microcontroladores, geralmente estas comunicações são efetuadas através do protocolo RS232, entretanto, se faz necessário à instalação de componentes externos que adequam os níveis de tensão das saídas dos microcontroladores aos níveis de tensão do protocolo. Este tipo de comunicação é implementada com apenas duas conexões, que são:

a) RX – conexão onde se recebe o dado;
b) TX – conexão onde se transmite o dado.

Podem ser citadas como vantagem e desvantagem do uso da comunicação USART:

Vantagem

a) A principal vantagem para se adotar a comunicação USART em conjunto com o protocolo RS232, reside na facilidade com a qual o mecanismo pode ser instalado, além de ser extremamente descomplicado e ser acessível na imensa maior parte dos computadores, sejam antigos ou modernos.

Desvantagem

a) A principal desvantagem da utilização da comunicação USART em conjunto com o protocolo RS232 é a necessidade da utilização de componentes externos para a adequação dos sinais de tensão.

3 MEDIDOR DE ENERGIA ELÉTRICA

Este capítulo contemplará a fase de desenvolvimento do medidor de energia elétrica. Serão abordados aspectos da aquisição de sinais, componentes envolvidos, desenvolvimento de *firmware*, *hardware* e testes.

O medidor de energia deste projeto apresentará a seguintes características:

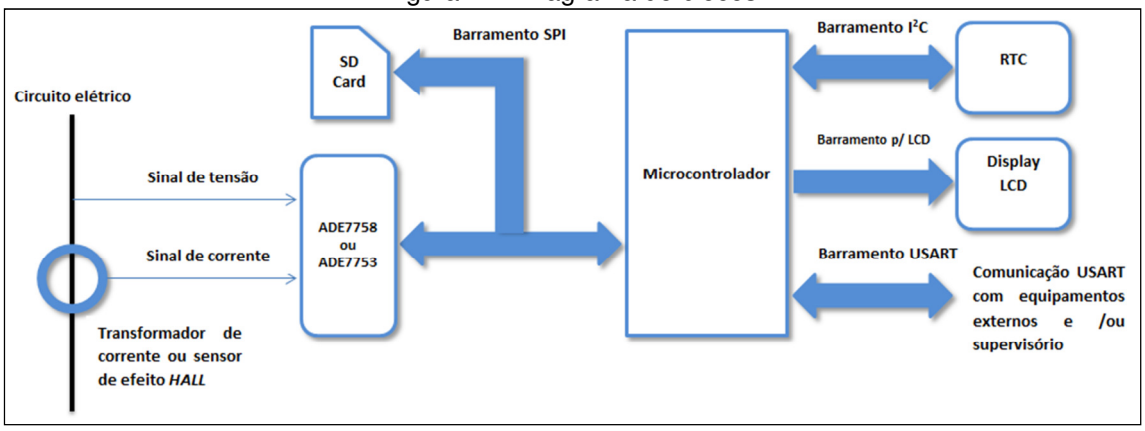
a) Medidor a quatros fios e três elementos.
b) Pode ser utilizado em medições indiretas de alta e baixa tensão.
c) Os sinais de corrente podem ser provenientes de transformadores de corrente ou sensores de efeito Hall.
d) Cartão de memória para gravação dos dados medidos.
e) Base de tempo real com informação de data e horário.
f) Comunicação USART com equipamentos externos e supervisório.

As características elétricas, mecânicas bem como os limites toleráveis de erro do medidor atendem ao disposto na NBR 14519 – Medidores Eletrônicos de Energia Elétrica Estáticos Especificações.

Medidores de energia elétrica tem sua classe de exatidão de acordo com a conexão do circuito a ser medido (ANEEL, 2005). O medidor deste projeto é especificado para circuitos de baixa tensão com ligação de potencial direta sem a utilização de transformador de instrumento, e ligação do circuito de corrente através de transformador de corrente ou sensor de corrente por efeito *Hall.* De acordo com o módulo 5 do Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST) para este tipo de conexão o erro máximo admissível para o medidor de energia elétrica é 2 %. Sendo que o transformador de corrente, para fins de medição, deve ter classe de exatidão igual a 0,6 %, a incerteza provável, de acordo com a Tabela 1 do PRODIST (Anexo A), para o sistema de medição todo é de 2,09 %, posicionando o medidor de energia na classe 2 (ANEEL, 2005).

O diagrama de blocos que representa o medidor de energia com todos seus periféricos são apresentados na Figura 22.

Figura 22 - Diagrama de blocos



Fonte: o autor

3.1 AQUISIÇÃO DE SINAIS

A aquisição de sinais no presente projeto trata do processo de medição dos sinais de corrente e tensão do circuito.

Predefiniu-se que as informações de corrente para o medidor são repassadas por um sensor de corrente por efeito *Hall*, visto que são mais seguros de manipular e seu sinal de saída, potencial, é facilmente lido por qualquer conversor analógico digital. Para os testes foram utilizados dois sensores de corrente diferentes, conforme é demonstrado na Tabela 2.

Tabela 2 – Comparativo entre sensores por efeito *Hall*

CARACTERÍSTICAS	FLUKE i30	MINIPA CA-1000
Sensibilidade	$100mV/A$	$1mV/A$
Gama de Corrente	20 A AC rms ou DC	1000 A AC rms ou DC
Precisão	± 1 % da leitura ± 2 mA	± 2 % da leitura + 2 A
Resolução	1 mA	-
Gama de frequência	DC até 20 kHz	50 – 400 Hz
Diâmetro máximo do condutor	19 mm	57 mm

Fonte: o autor

A partir da tabela acima nota-se que os sensores apresentam sensibilidade e gama de corrente bastante distintas, sendo assim, a definição de utilização de cada um se dá em função da corrente a ser medida. Em função dos sensores serem utilizados para medição de energia elétrica em circuitos onde a frequência será

exclusivamente de 60 Hz, ambos os sensores podem ser utilizados em um medidor de energia. As Figuras 23 e 24 apresentam os sensores Fluke i30 e Minipa CA-1000 respectivamente.

Figura 23 - Sensor Fluke i30

Fonte: FLUKE (2015)

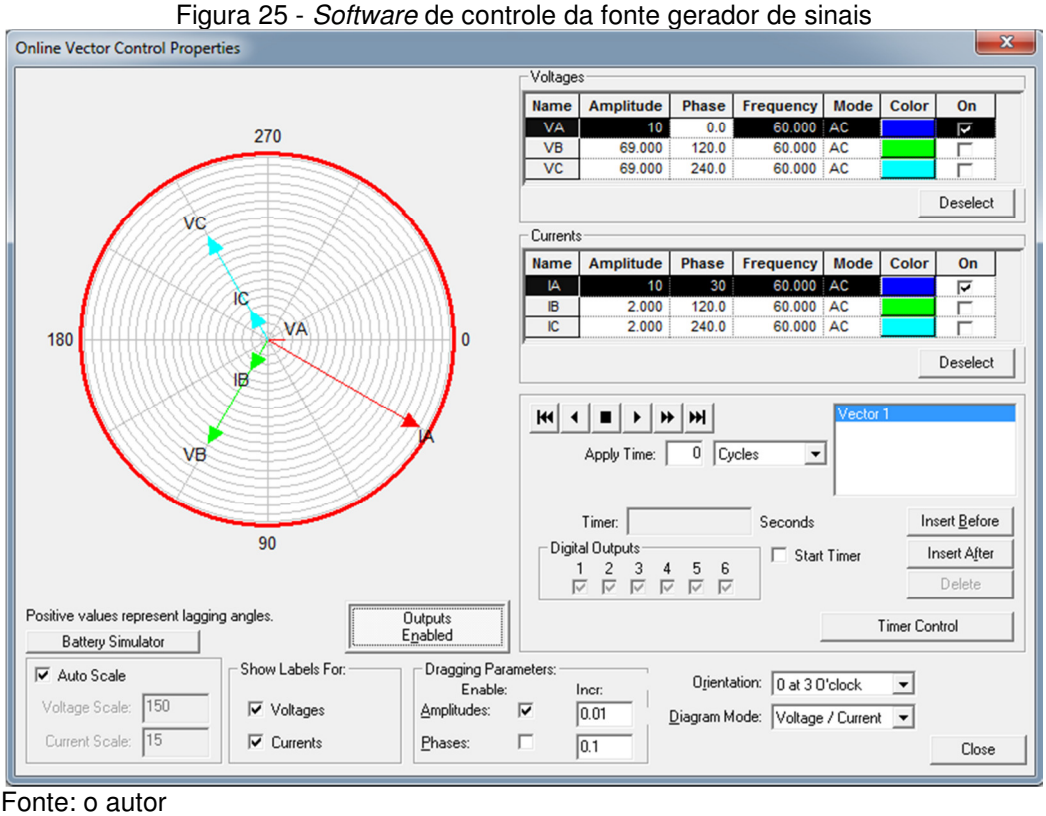
Figura 24 - Sensor Minipa CA-1000

Fonte: MINIPA (2015)

Para a execução dos testes, a geração dos sinais de corrente e tensão ficam por conta de uma fonte de tensão e corrente trifásica programável. A referida fonte permite injetar correntes e tensões com ângulos e frequências distintas e variáveis. A fonte utilizada nos testes é a MPRT 8430 da fabricante Megger, a qual tem capacidade de fornecer como valores máximos de corrente e tensão 30 A e 200 V em regime contínuo (MEGGER, 2015). Devido à limitação da corrente em 30 A, escolheu-se o sensor Fluke i30 para os testes, visto que o sensor CA-1000 opera com maior precisão em correntes altas que não são possíveis de se conseguir com a fonte.

A fonte geradora de sinais é controlada a partir de um *software*, no qual são informados os parâmetros de tensão e corrente. A Figura 25 apresenta a tela de controle da fonte. As Figuras 26 e 27 mostram a fonte MPRT 8430 e a montagem em laboratório com a referida fonte, osciloscópio e o sensor *Hall* respectivamente.

Figura 25 - *Software* de controle da fonte gerador de sinais



Fonte: o autor

Figura 26 - Fonte trifásica geradora dos sinais

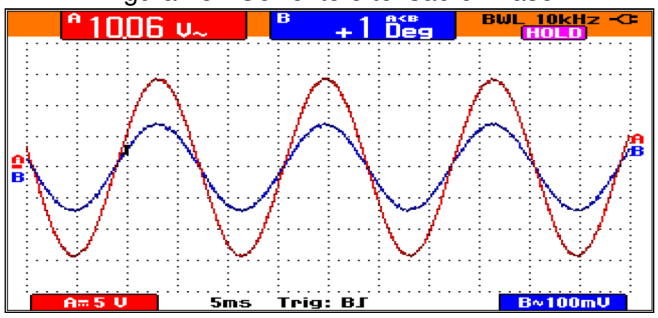
Fonte: MEGGER (2015)

Figura 27 - Montagem em laboratório

Fonte: o autor

A Figura 28 apresenta a tensão de saída do sensor de corrente, onde a corrente que circula pelo circuito está em fase com o sinal de tensão de referência. Espera-se que os sinais de saída do sensor sejam imagens fidedignas do sinal de entrada em relação à natureza do sinal, ao ângulo de fase e frequência, entretanto, com módulos reduzidos para ser tornarem mensuráveis pelos dispositivos eletrônicos.

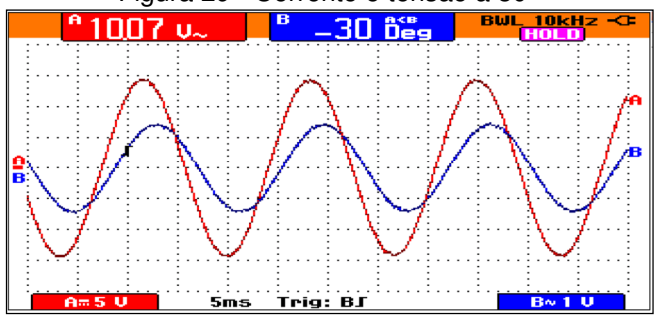
Figura 28 - Corrente e tensão em fase



Fonte: o autor

A Figura 29 apresenta os sinais de tensão e corrente, defasados em 30°.

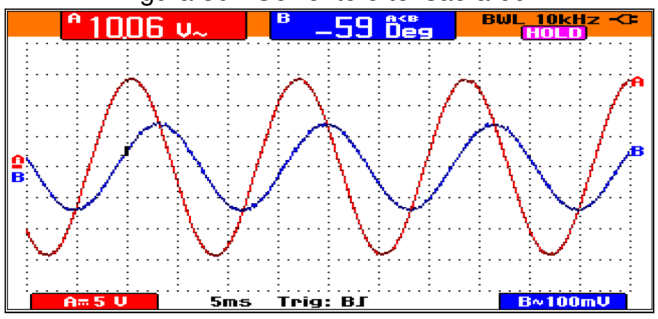
Figura 29 - Corrente e tensão a 30°



Fonte: o autor

Os sinais de corrente e tensão apresentados na Figura 30 possuem defasagem de 60°. Vale ressaltar que em todas as imagens o sinal de tensão de referência permaneceu fixo com valor de 10 Vrms e representa a curva plotada em vermelho, enquanto que o sinal da saída do sensor de corrente é o sinal azul e apresenta valor eficaz de 1 A na Figura 28 e Figura 30, e 10 A na Figura 29 .

Figura 30 - Corrente e tensão a 60°



Fonte: o autor

A partir das três imagens pode-se comprovar que o sensor Fluke i30 não alterou a natureza, frequência ou fase do sinal, sendo assim, o mesmo pode ser utilizado para fins de medição de energia elétrica.

Devido às características do circuito integrado utilizado especificamente para a medição da energia, o sinal de tensão será disponibilizado a partir de um divisor de tensão resistivo. Este assunto será tratado no tópico 3.3.

3.2 MICROCONTROLADOR

Devido a algumas características específicas do projeto, a escolha do microcontrolador deu-se primordialmente pelos seus aspectos de comunicação de dados e memória de programa. A quantidade de pinos de entrada e saída também é importante na definição do microcontrolador, visto que necessita atender aos botões, *display LCD* e LM35. O projeto utiliza os módulos de comunicação *SPI*, I^2C e USART, desta forma, o microcontrolador necessariamente precisa possuir todos os módulos citados.

A partir desta premissa, o microcontrolador escolhido foi da fabricante Microchip, mais especificamente da família PIC18F, que se trata de microcontroladores com arquitetura de 8 bits. O modelo de microcontrolador que atende aos critérios estabelecidos, e utilizado no presente projeto é o PIC18F4620. Na Tabela 3 são destacadas as características do PIC18F4620.

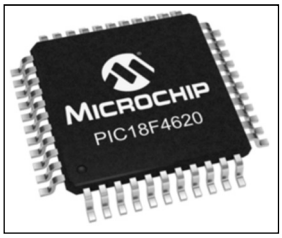
Tabela 3 - Características PIC18F4620

PARÂMETRO	**VALOR**
Tipo de memória do programa	Flash
Memória do programa (kB)	64
Periféricos de comunicação	1 – UART, 1 – USART, 1 – *SPI*, 1 – I^2C, MSSP (*SPI*/ I^2C)
Timers	1 x 8 bit – 3 x 16 bit
ADC	13 canais – 10 bit
Faixa de temperatura (°C)	-40 a 125
Faixa de tensão (V)	2 – 5,5
Pinos	44

Fonte: MICROCHIP (2015)

Na Figura 31 é apresentado o PIC18F4620 com 44 pinos e pinagem TQFP semelhante ao utilizado neste projeto.

Figura 31 - Microcontrolador PIC18F4620



Fonte: MICROCHIP (2015)

Uma facilidade dos microcontroladores da família PIC é a possibilidade de ser programado em linguagem C, para tanto é necessário a utilização de um *software* compilador. Neste projeto utiliza-se o compilador MikroC Pro for PIC da fabricante MikroElektronika, o qual possui diversas bibliotecas prontas e uma versão de avaliação.

3.3 MÓDULO PARA MEDIÇÃO DE POTÊNCIA

Após os sinais de corrente e tensão serem adquiridos, existe a necessidade dos mesmos serem tratados a fim de calcular a energia, entretanto o cálculo da energia elétrica não utiliza somente os módulos dos referidos sinais, suas frequências e ângulos de fase também o influenciam. Sendo assim, a utilização de componentes de eletrônica analógica, como resistores, capacitores e amplificadores operacionais para o tratamento destes sinais podem trazer perdas, atrasos de sinais e distorções que comprometeriam a exatidão do medidor.

Uma solução possível é a utilização de circuitos integrados específicos para a medição de energia elétrica. Este tipo de circuito integrado recebe os sinais de tensão e corrente e efetua os mais diversos cálculos para as energias ativa, reativa e aparente, logo após, estes dados são transferidos ao microcontrolador.

Diversos fabricantes oferecem circuitos integrados com a função de medição de energia elétrica. Para este projeto a escolha do CI se deu em função da comunicação entre ele e o microcontrolador ser através de barramento *SPI* e das grandezas medidas.

Os sinais de potencial para os módulos de medição de potência são provenientes de divisores de tensão resistivos, este método garante que o sinal aquisitado estará em fase com o sinal original e também não modifica sua natureza, somente reduz seu módulo. Quanto aos sinais de corrente, os dois circuitos

integrados permitem a utilização de transformadores de corrente ou sensores de efeito *Hall*.

O módulo escolhido é um CI para medição de circuitos trifásicos de alta precisão com interface serial, circuito integrador digital, sensor de temperatura e todo processamento de sinal necessário para efetuar os cálculos de medição de energia ativa, reativa e aparente. Este CI é adequado para medição de energia nas configurações estrela e triângulo, a três ou quatro fios. Fornece recursos de calibração para cada uma das fases. A Tabela 4 apresenta algumas das características do módulo de medição de potência.

Tabela 4 - Características módulo de medição de potência

PARÂMETRO	**ESPECIFICAÇÃO**
Erro de medição de energia ativa	0,1 %
Máximo nível de sinal nas entradas analógicas	± 500 mV entrada diferencial
Alimentação	5 V ± 5 %

Fonte: o autor

A concepção totalmente digital assegura que as combinações de fase entre os canais de corrente e canais de tensão em todas as três fases é de ± 0,1 ° ao longo de uma gama de 45 Hz a 65 Hz.

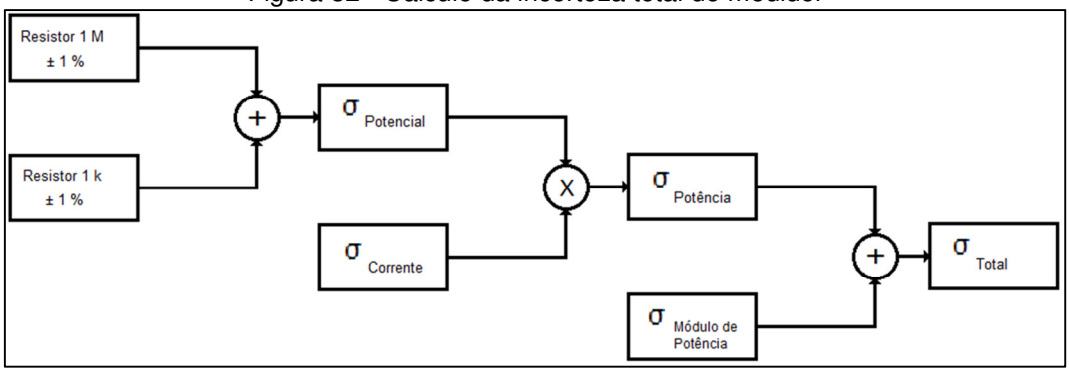
Citam-se abaixo algumas das grandezas registradas no módulo de medição de potência que são transmitidas via comunicação *SPI*:

a) Energia ativa acumulada por fase.
b) Energia reativa acumulada por fase.
c) Energia aparente acumulada por fase.
d) Corrente eficaz por fase.
e) Tensão eficaz por fase.
f) Frequência.
g) Detecção de afundamento de tensão.
h) Detecção de picos de tensão por fase.
i) Detecção de picos de corrente por fase.

O módulo permite guardar em um registrador específico as amostras das formas de onda dos canais de tensão e corrente. Durante a amostragem das formas de onda os cálculos de energia permanecem inalterados. Pode-se optar por quatro taxas de amostragem: 26,04 kSPS, 13,02 kSPS, 6,51 kSPS e 3,25 kSPS.

Após definir-se o módulo de medição de potência e de qual forma são aquisitadas a corrente e potencial do circuito, é possível calcular o erro total estimado do medidor. Utilizou-se o método da propagação de incertezas para o cálculo do erro total, pois se trata de incertezas combinadas. A Figura 32 ilustra o diagrama de blocos para o cálculo da incerteza total. Nos cálculos, as incertezas são definidas pela letra grega σ (sigma).

Figura 32 - Cálculo da incerteza total do medidor



Fonte: o autor

O cálculo da incerteza total é dividido em três etapas: incerteza do circuito de potencial, incerteza do cálculo da potência em relação às incertezas do sensor de corrente e do divisor resistivo do potencial e incerteza do módulo de potência (BALBINOT e BRUSAMARELLO, 2006). O sinal de potencial que se tem na entrada do módulo de potência é proveniente de um divisor de tensão resistivo composto por um resistor de 1 M ± 1 % e outro resistor 1 k ± 1 %. Na Equação 18 é apresentada a incerteza equivalente do circuito de potencial.

$$\sigma_{Potencial} = \sqrt{\sigma_{1M}^2 + \sigma_{1k}^2} = 1{,}414\% \tag{18}$$

A segunda etapa do cálculo utiliza a incerteza do circuito de potencial anteriormente calculada, associada à incerteza do sensor de corrente utilizado. O cálculo da incerteza da potência é apresentado na Equação 19.

$$\sigma_{Potência} = \sqrt{I^2.\sigma^2_{Potencial} + V^2.\sigma^2_{Corrente}} = 1{,}73\% \quad (19)$$

Onde:

$\sigma_{Potência}$ – Incerteza equivalente da potência.
I – Corrente máxima do sensor de corrente 20 A.
V – Tensão máxima da entrada de potencial 500 V.
$\sigma_{Corrente}$ – Incerteza do sensor de corrente ± 1 %.

A incerteza total do medidor é a associação da incerteza do cálculo da potência com a do módulo de medição de potência, seu cálculo é apresentado na Equação 20.

$$\sigma_{Total} = \sqrt{\sigma^2_{Potência} + .\sigma^2_{Módulo}} = 1{,}7328\% \quad (20)$$

Onde:

$\sigma_{Módulo}$ – Incerteza do módulo de medição de potência 0,1 %.

3.4 GRAVAÇÃO DOS DADOS E BASE DE TEMPO

O medidor de energia possui a possibilidade de gravação das medidas efetuadas por ele. Todos os dados são gravados em um cartão SD, e podem ser acessadas em qualquer computador. Esta ferramenta é bastante útil para fins de gerenciamento energético e análise de qualidade de energia, visto que além de informações de energia ativa, reativa e aparente, os valores de tensão, corrente e frequência também podem ser gravados.

A comunicação do cartão SD com o microcontrolador é feita através de seu barramento *SPI*, entretanto devido aos pinos do cartão operarem em 3,3 V e os pinos do microcontrolador operarem em 5 V, é necessário um divisor resistivo para adequar os níveis de tensão para o cartão SD. A tensão aplicada aos pinos do cartão é expressa pela Equação 21.

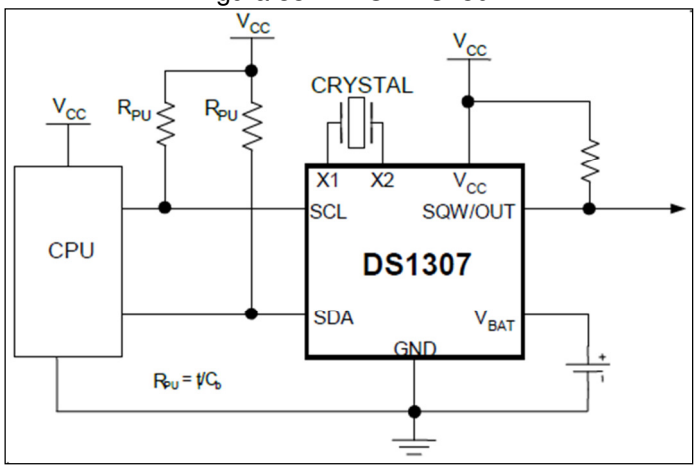
$$V_{SD} = \frac{5}{3k3 + 2k2} \cdot 3k3 = 3V \tag{21}$$

Todas as informações gravadas no cartão são acompanhadas de base de tempo, isto é, toda gravação terá data e horário associado a essa informação. Para tanto, o medidor é dotado de um circuito integrado que possui a função de informar a data e hora dos eventos.

Para o presente projeto foi escolhido o circuito integrado chamado RTC (*Real Time Clock*) modelo DS1307 da fabricante Maxim, o qual se comunica com o microcontrolador a partir do barramento I^2C. O DS1307 fornece ao medidor de energia as informações de hora, minuto, segundo, dia, mês, ano e dia da semana, o próprio integrado faz a correção de meses de 30 ou 31 dias, bem como o ajuste para anos bissextos.

É possível conectar uma bateria de 3 V ao DS1307 a fim de que eventuais faltas de energia não o deixarão perder os parâmetros de data e hora. Esta bateria funciona como *backup* da alimentação, o próprio CI seleciona qual das alimentações será a prioritária. A Figura 33 apresenta a ligação típica do DS1307.

Figura 33 - RTC - DS1307



Fonte: MAXIM INTEGRATED (2015)

Para conectar o DS1307 ao barramento I^2C do microcontrolador é necessário utilizar dois resistores de *pull-up*, isto se dá devido a sua saída ser em dreno aberto. A Equação 22 demonstra o cálculo dos resistores para o barramento, esta equação e os valores dos parâmetros da mesma estão de acordo com o *datasheet* do DS1307.

$$R_{PU} = \frac{t_r}{C_b} = \frac{1000ns}{400pF} = 2{,}5k\Omega \quad (22)$$

Onde:

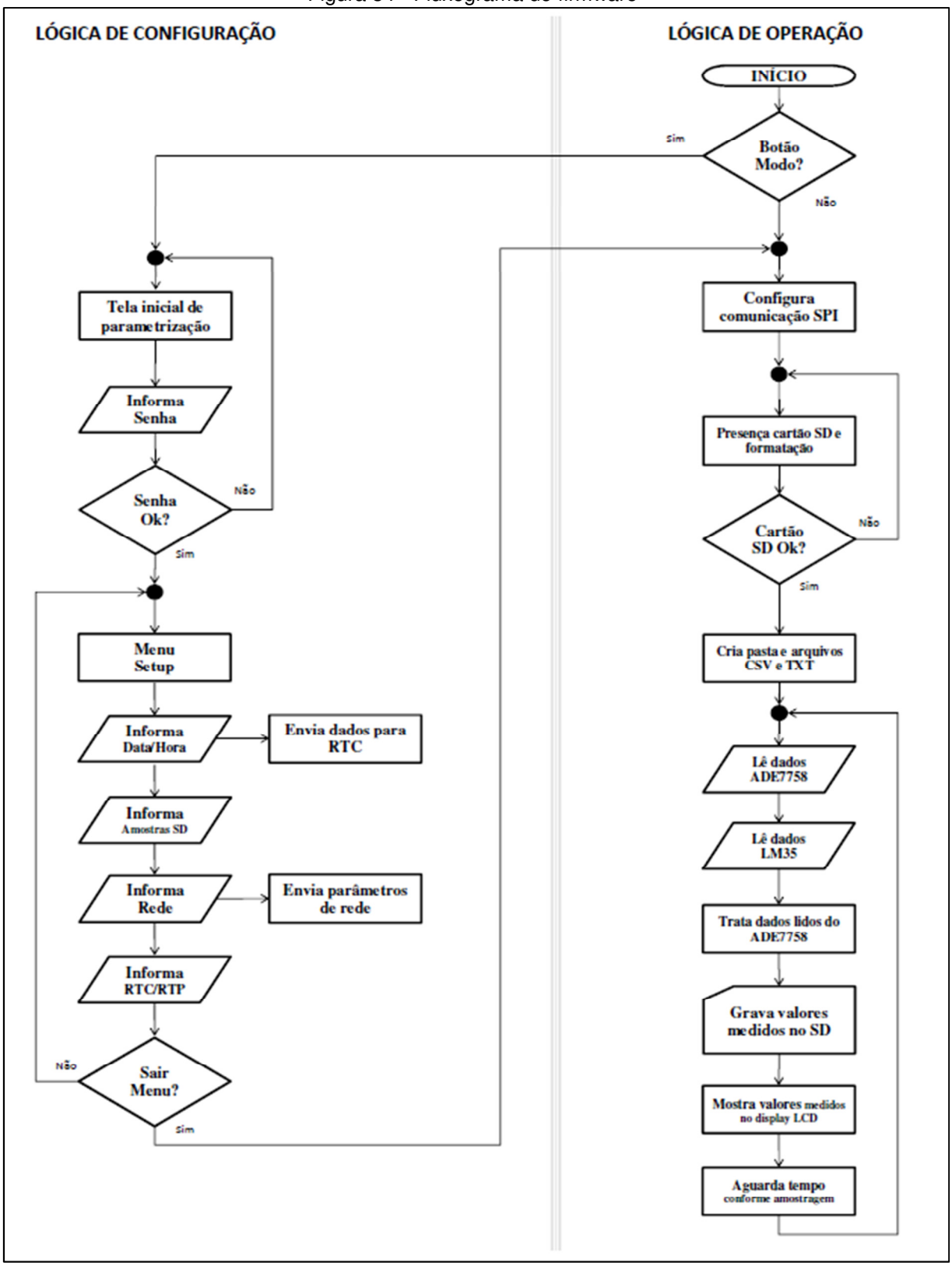
R_{PU} – resistor de *pull-up*.

t_r – tempo de ascensão dos sinais SDA e SCL.

C_b – Capacitância de carga do barramento.

3.5 FIRMWARE

Figura 34 - Fluxograma do firmware



Fonte: o autor

A Figura 34 apresenta o fluxograma do *firmware* implementado no microcontrolador.

A primeira instrução do programa é a leitura de senha para alteração dos parâmetros do medidor, que são os seguintes:

a) Data e hora;
b) Quantidade de amostras gravadas por minuto no cartão SD;
c) Dados da rede – IP e máscara de rede;
d) Relação de transformação de TC e TP (se houver).

A parametrização do medidor é executada somente uma vez, não podem ser alterados os parâmetros de medição com o medidor em operação. Toda troca de parâmetros necessitará a reinicialização do medidor.

Após serem informados os parâmetros, o programa verifica a presença do cartão SD e se o mesmo está formatado corretamente. Para ser utilizado com o medidor de energia deste projeto, o cartão SD necessita estar no formato FAT16. Confirmada a existência e formatação do cartão, o próximo passo do programa é criar os arquivos AAAAMMDDHHMM.csv e AAAAMMDDHHMM.txt no cartão. No primeiro arquivo são gravadas todas as medições com as informações de data e hora associadas, enquanto o segundo arquivo traz os dados de *setup* do medidor que o usuário informou no início da execução do programa.

A escolha pela utilização da extensão .CSV se dá devido à facilidade que a mesma traz na criação de arquivos com diversas informações divididas em colunas. A partir desta premissa, criou-se no *firmware* uma variável com os valores a serem gravados separados por ponto e vírgula. Na Figura 35 são apresentadas a variável utilizada no código do programa e a tabela gerada com os valores gravados no cartão SD.

Figura 35 - Arquivos de dados do cartão SD

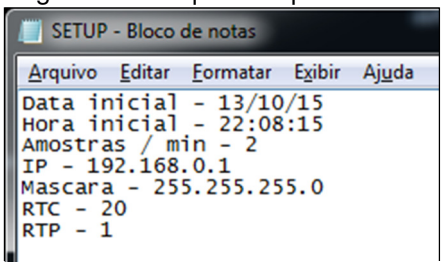
```
char txt1[61] = "DATA;HORA;DIA;W;Q;S;FP;VRMS;IRMS\r";
```

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	DATA	HORA	DIA	W	Q	S	FP	VRMS	IRMS	
2	13/10/2015	22:08:15	TER	0	0	0	0	0	0	
3	13/10/2015	22:08:45	TER	0	0	0	0	0	0	
4	13/10/2015	22:09:15	TER	0	0	0	0	0	0	
5	13/10/2015	22:09:45	TER	0	0	0	0	0	0	
6	13/10/2015	22:10:15	TER	0	0	0	0	0	0	
7	13/10/2015	22:10:45	TER	0	0	0	0	0	0	
8	13/10/2015	22:11:15	TER	0	0	0	0	0	0	
9										

Fonte: o autor

O arquivo criado com a extensão .TXT traz todos os dados da parametrização do medidor. Estes dados são importantes para validar as medições efetuadas, por exemplo, se a relação de transformação de um transformador de corrente for parametrizada errada, toda a energia registrada pelo medidor estará incorreta. Para o medidor é necessário informar somente a relação de transformação tanto para os transformadores de tensão quanto os de corrente, não sendo necessário informar quais são os valores primários para estes transformadores. A Figura 36 demonstra o arquivo .TXT com os valores de parametrização do medidor.

Figura 36 – Arquivo de parâmetros



Fonte: o autor

A leitura das medições efetuadas pelo módulo de potência é o próximo passo do programa através do barramento *SPI*, todos os registradores contendo as leituras das grandezas medidas são informados ao microcontrolador. Os valores repassados pelo módulo são tratados pelo microcontrolador que após este processamento os envia ao cartão SD e alguns deles ao *display LCD*. Este último irá mostrar a data, hora, dia da semana e as energias medidas, sendo que, conforme o item 7.1.2.5 da NBR 14519, o tempo de apresentação de cada uma das informações na tela será de 6 segundos para cada informação. As medidas que serão mostradas alternadamente no display são: energia ativa acumulada, energia reativa acumulada e tensão eficaz da fase A. Entretanto, todas as medidas efetuadas pelo módulo de potência podem ser disponibilizadas ao *display LCD*.

O compilador utilizado dispõe de diversas bibliotecas específicas que auxiliam na programação, por exemplo, da gravação de dados no cartão de memória e utilização da comunicação I^2C em conjunto com outras formas de comunicação serial. Os nomes das bibliotecas anteriormente citadas, respectivamente são:

a) Mmc_Fat16
b) Soft_i2c

A biblioteca Mmc_Fat16 é utilizada para a geração dos arquivos no cartão SD e a gravação dos dados nestes arquivos. A biblioteca Soft_i2c é utilizada neste projeto devido ao microcontrolador utilizado compartilhar os mesmos pinos para a comunicação *SPI* e I^2C. Em função disto, a mesma emula a comunicação I^2C a qualquer pino do microcontrolador, permitindo assim a utilização simultânea das duas comunicações em um mesmo microcontrolador.

Para facilitar a implementação do *firmware* desenvolvido, foram criadas diversas rotinas, elas são usadas para leitura de botões, mostrar menu de parâmetros, leitura e escrita do *RTC*, leitura e verificação de senha entre outras. Como exemplo da utilização de rotinas, cita-se o menu de parâmetros do medidor, que basicamente usa uma lógica *switch-case*[1] para selecionar a entrada a ser alterada, sendo o resultado desta lógica passado como um parâmetro para outra rotina que executa a alteração dos parâmetros de medição. Na Figura 37 é apresentado um fragmento do *firmware* onde é utilizada lógica *switch-case* para criar o menu de parâmetros do medidor.

Figura 37 – Menu de parâmetros

```
switch (contador)
{
      case 1:
           Lcd_Out(2,1,"Data/Hora       ");
              if (ok_button == 0){
                 executa_Setup(contador);
                 goto menu;
              }
           break;
      case 2:
           Lcd_Out(2,1,"Amostras SD Card");
              if (ok_button == 0){
                 executa_Setup(contador);
                 goto menu;
              }
           break;
      case 3:
           Lcd_Out(2,1,"Rede            ");
              if (ok_button == 0){
                 executa_Setup(contador);
                 goto menu;
              }
           break;
      case 4:
           Lcd_Out(2,1,"RTC             ");
```

Fonte: o autor

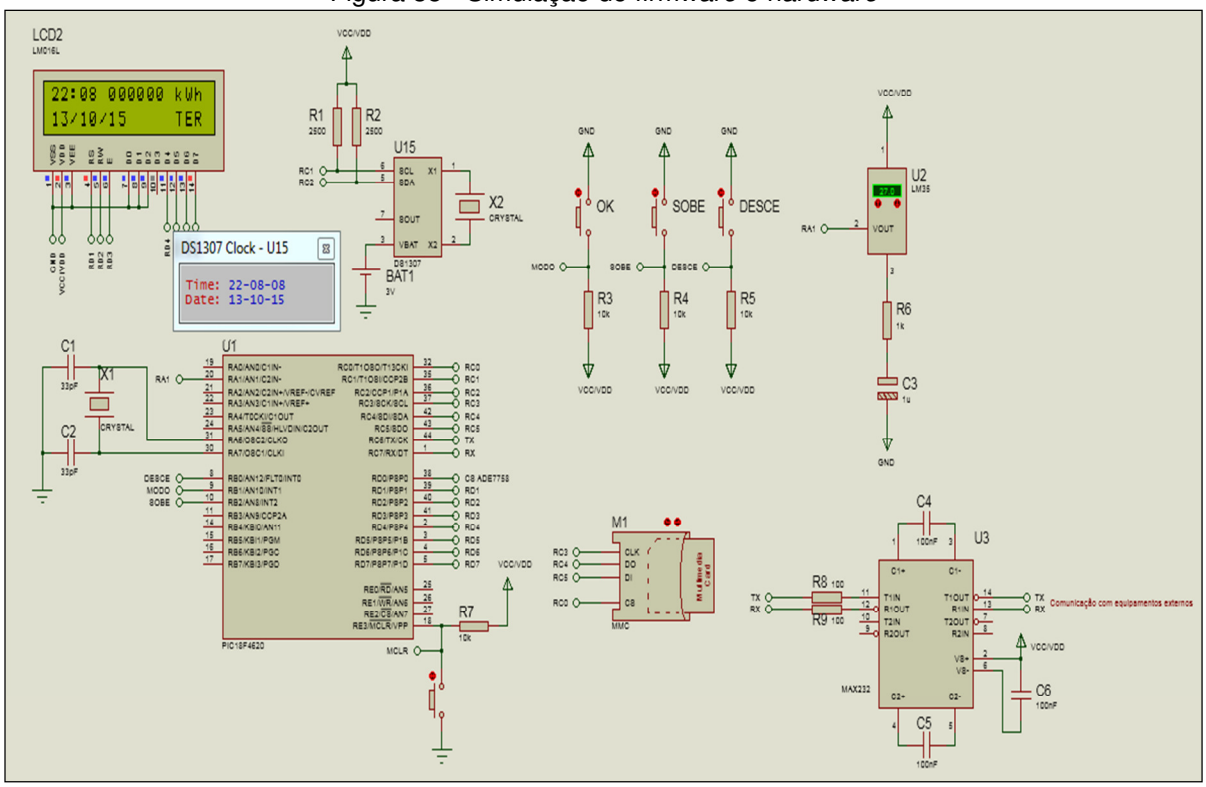
[1] Lógica de programação utilizada em linguagem C, é uma forma de estrutura seletiva.

3.6 SIMULAÇÃO

Uma forma de análise do funcionamento do circuito é a utilização de um *software* simulador de circuitos eletrônicos. No presente projeto utilizou-se o aplicativo Proteus 8, o qual permite a simulação tanto do *hardware* quanto do *firmware*, e de circuitos eletrônicos analógicos bem como de circuitos eletrônicos digitais. O simulador dispõe além dos componentes necessários a montagem dos circuitos, também as ferramentas de análise comumente utilizadas em laboratório como osciloscópio, voltímetros, amperímetros, geradores de sinais, testador de sinais *SPI*, testador de sinais I^2C e terminal virtual de comunicação serial.

Dos componentes utilizados neste projeto, somente o CI de medição de potência não está disponível para simulação, sendo assim, a simulação do circuito ficou restrita à utilização dos botões, gravação de dados no cartão SD, leitura e escrita no *RTC*, leitura no *display LCD*, comunicação com equipamentos externos e leitura do LM35. A Figura 38 apresenta a imagem da tela de simulação.

Figura 38 - Simulação de *firmware* e *hardware*



Fonte: o autor

Para simular o cartão SD é necessária a criação de um disco virtual, neste disco são gravados todos os dados enviados ao cartão. É necessário que o disco virtual esteja no formato Fat16 para que o simulador o reconheça.

3.7 CONFECÇÃO DA PLACA DE CIRCUITO IMPRESSO

Este item demonstra todas as definições para o projeto e a montagem da placa de circuito impresso do medidor de energia.

3.7.1 Alimentação e Gravação do *Firmware*

Antes de ser determinada a montagem da placa de circuito impresso do medidor, é necessário definir a forma que o circuito será alimentado e qual método utilizado para a gravação do código no microcontrolador.

O medidor será alimentado a partir de uma fonte externa de 12 Vcc, entretanto todos componentes eletrônicos que o constituem operam com tensões de 5 Vcc ou 3,3 Vcc. Para adequar as tensões nos componentes, o medidor será dotado de dois circuitos reguladores de tensão que irão disponibilizar as tensões adequadas.

A gravação do *firmware* será realizada através da técnica *In Circuit Serial Programming (ICSP)*, ela permite que o microcontrolador seja gravado mesmo depois de estar conectado a uma placa de circuito impresso. Este tipo de gravação requer apenas conexão a dois pinos do microcontrolador, sendo menos intrusiva, permitindo alterações rápidas do código gravado.

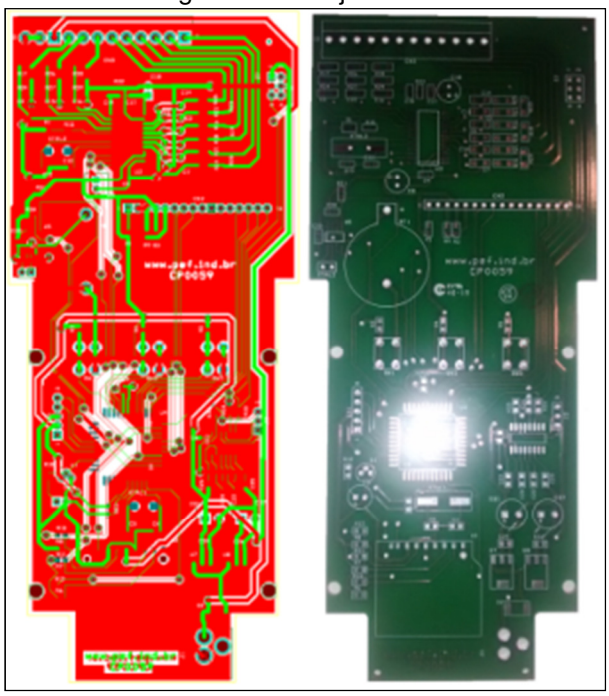
3.7.2 Projeto e layout da placa

A placa de circuito impressa do medidor de energia foi projetada a partir do *software* Orcad, nela aparecem todos os componentes e conectores utilizados. O circuito é apresentado no Apêndice A.

O *layout* da placa foi definido a partir da caixa onde a mesma será alojada. Na Figura 39 são apresentados o projeto e a PCI. A caixa escolhida é do tipo coletor de dados, o qual já possui espaço para o *display LCD* e diversas esperas para

botões, das quais apenas três serão utilizadas. A Figura 40 apresenta a PCI e a caixa coletora de dados.

Figura 39 – Projeto x PCI



Fonte: o autor

Figura 40 - Placa e caixa

Fonte: o autor

4 RESULTADOS

Após a confecção da placa e montagem dos componentes, o primeiro teste efetuado foi a gravação do *firmware* no microcontrolador. Conforme citado anteriormente, a gravação foi executada pelo método *ICSP*, não necessitando retirar o microcontrolador da placa onde já se encontrava instalado. A Figura 41 mostra a bancada de desenvolvimento do trabalho o processo de testes bem como a gravação do *firmware.*

Figura 41 - Gravação de *Firmware*

Fonte: o autor

De acordo com a NBR 14519, os medidores eletrônicos devem passar por diversos ensaios até sua aceitação. A seguir são citados alguns dos ensaios efetuados para aceitação de medidores eletrônicos:

a) Dielétrico;
b) Ensaio de corrente de partida;
c) Influência da temperatura ambiente;
d) Influência da variação de corrente;
e) Ensaio das grandezas de influência.

Dos ensaios citados acima, o que se refere às grandezas de influência foi realizado em laboratório, os demais citados e alguns outros que constam na norma serão executados futuramente. A norma determina algumas situações para estes testes que são possíveis somente em laboratórios específicos de metrologia, sendo assim, o ensaio realizado no medidor deste trabalho visou comparar a incerteza das medidas efetuadas em um período de tempo pré-determinado com a incerteza calculada.

O primeiro ensaio efetuado utilizou os seguintes parâmetros de tensão e corrente aplicados ao medidor:

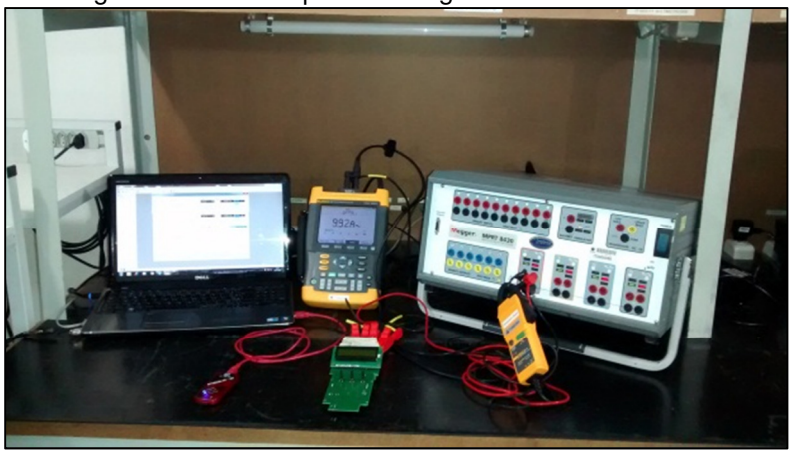
a) Tensão de Fase - $100\angle 0^0 V$

b) Corrente de Fase - $10\angle 0^0 A$

O ensaio consiste em aplicar os valores acima no medidor em um intervalo de tempo de uma hora. Com os valores apresentados acima, tem-se um circuito com uma potência instantânea de 1000 W. Ao aplicar-se esta potência num período de uma hora, ao final tem-se 1 kWh, e este é o valor que espera-se ler no *display LCD* do medidor quando o ensaio for concluído.

Para a execução do ensaio foi utilizada uma fonte trifásica geradora de sinais e somente uma das fases. Optou-se pelo ensaio com tensão e corrente em fase para a verificação da medição de energia ativa do medidor. Deste modo, as energias ativa e aparente possuem valores iguais, devido ao fator de potência do circuito ser igual a 1. Na Figura 42 é apresentada a montagem em laboratório para o ensaio do medidor.

Figura 42 – Ensaio parcial das grandezas de influência



Fonte: o autor

As medidas efetuadas durante o ensaio foram gravadas no cartão de memória para auxiliarem nos cálculos das incertezas. O medidor foi parametrizado com a data e horário dos testes, foi definido para o teste que a gravação no cartão de memória seria a cada um minuto e as relações de transformação ficaram com

valores unitários, visto que não foram utilizados transformadores de potencial ou corrente.

A Figura 43 apresenta a tela de entrada nas parametrizações do medidor durante o seu ensaio, enquanto que a Figura 44 demonstra o medidor na execução do menu de parâmetros.

Figura 43 – Tela do medidor

Fonte: o autor

Figura 44 – Menu de parâmetros

Fonte: o autor

As imagens a seguir foram capturadas durante a execução do ensaio com o medidor. Na Figura 45 é apresentado o início do ensaio, por sua vez, a Figura 46 apresenta a tela do medidor quando o ensaio estava próximo da metade do tempo estipulado.

Figura 45 – Medição de energia ativa inicial

Fonte: o autor

Figura 46 – Medição de energia ativa no ensaio

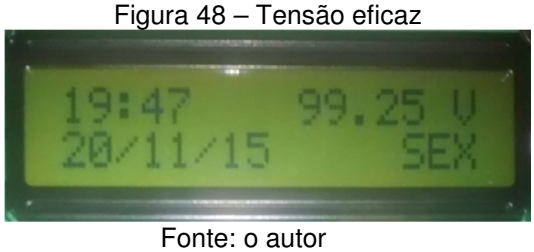
Fonte: o autor

Durante o ensaio o *display LCD* também demonstrava o valor eficaz da tensão e da corrente que eram aplicadas ao medidor. A Figura 47 apresenta a corrente eficaz aplicada ao medidor no ensaio, à medida que a tensão eficaz do ensaio é demonstrada na Figura 48.

Figura 47 – Corrente eficaz

Fonte: o autor

Figura 48 – Tensão eficaz



Fonte: o autor

Ao final do ensaio foi lido o arquivo onde foram gravadas as medidas efetuadas. Todas as leituras de energia ativa, reativa, aparente, fator de potência, tensão eficaz e corrente eficaz ficaram registradas com intervalos de um minuto como foi parametrizado. Na Figura 49 é apresentada a imagem do arquivo de medidas gerado pelo medidor.

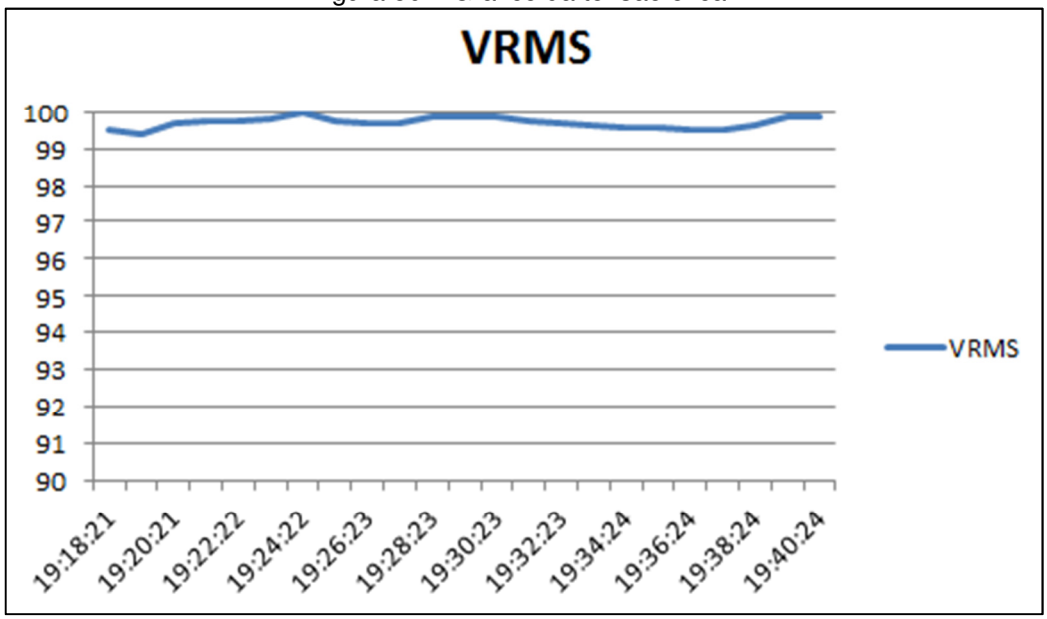
Figura 49 – Arquivo gerado pelo medidor

1	DATA	HORA	DIA	W	Q	S	FP	VRMS	IRMS
2	20/11/2015	19:18:21	SEX	3	0	3	1	99.5	9.92
3	20/11/2015	19:19:21	SEX	17	0	17	1	99.4	9.92
4	20/11/2015	19:20:21	SEX	31	0	31	1	99.7	9.91
5	20/11/2015	19:21:22	SEX	48	0	48	1	99.72	9.9
6	20/11/2015	19:22:22	SEX	64	0	64	1	99.77	9.89
7	20/11/2015	19:23:22	SEX	82	0	82	1	99.8	9.94
8	20/11/2015	19:24:22	SEX	98	0	98	1	99.95	10.1
9	20/11/2015	19:25:23	SEX	116	0	116	1	99.76	9.92
10	20/11/2015	19:26:23	SEX	131	0	131	1	99.68	9.91
11	20/11/2015	19:27:23	SEX	149	0	149	1	99.66	9.92
12	20/11/2015	19:28:23	SEX	165	0	165	1	99.84	9.96
13	20/11/2015	19:29:23	SEX	182	0	182	1	99.85	9.96
14	20/11/2015	19:30:23	SEX	199	0	199	1	99.84	9.96
15	20/11/2015	19:31:23	SEX	216	0	216	1	99.75	9.9
16	20/11/2015	19:32:23	SEX	234	0	234	1	99.66	9.91
17	20/11/2015	19:33:23	SEX	252	0	252	1	99.64	9.91
18	20/11/2015	19:34:24	SEX	267	0	267	1	99.55	9.88
19	20/11/2015	19:35:24	SEX	284	0	284	1	99.54	9.9
20	20/11/2015	19:36:24	SEX	300	0	300	1	99.5	9.9
21	20/11/2015	19:37:24	SEX	316	0	316	0.99	99.5	9.9
22	20/11/2015	19:38:24	SEX	334	0	334	1	99.63	9.95
23	20/11/2015	19:39:24	SEX	351	0	351	1	99.88	9.94

Fonte: o autor

Com os dados coletados no cartão de memória foi possível criar um gráfico que demonstra o comportamento da tensão eficaz durante a execução dos ensaios. A Figura 50 apresenta o gráfico gerado a partir dos dados coletados.

Figura 50 – Gráfico da tensão eficaz



Fonte: o autor

Ao final do tempo estabelecido para o ensaio, o medidor registrava 984 Wh como consumo de energia ativa. De posse das informações registradas no cartão de memória é possível calcular a incerteza total para medição de energia ativa no ensaio. O cálculo da incerteza encontrada no ensaio é apresentado na Equação 23.

$$\sigma_{Total} = \left(1 - \frac{984}{1000}\right).100 = 1{,}6\% \tag{23}$$

5 CONCLUSÃO

Os resultados obtidos nos ensaios do medidor corroboram com a previsão teórica, mostrando que foi possível desenvolver um medidor de energia elétrica com características de incertezas e aquisição de sinais conforme normas técnicas nacionais.

A escolha do microcontrolador foi fundamental para o desenvolvimento do trabalho, pois o mesmo se comunicou com o módulo de medição de energia, cartão de memória e todos as demais entradas e saídas necessárias. A utilização do módulo de medição de energia atendeu às exigências do projeto, bem como permite a certificação junto aos órgãos responsáveis.

Para o desenvolvimento do firmware utilizou-se a plataforma MikroC, este atendeu ao desenvolvimento do protótipo, porém será necessário um outro compilador para otimizar o código fonte. Para tal já se iniciaram os testes utilizando o XC8 da Microchip, caso o código não seja otimizado suficientemente será alterado o microcontrolador que possua maior capacidade.

O projeto do esquemático e da placa de circuito impresso se tornaram necessários porque alguns componentes utilizados no medidor serem fornecidos exclusivamente em encapsulamento SMD, o que torna possível realizar os ensaios somente com a placa de circuito impresso fisicamente presente, destacando a necessidade da montagem no gabinete determinado. Foi necessária a utilização da técnica de *wire up*[2] na etapa de montagem em função de uma trilha não desenhada e o tamanho de um componente que não estava de acordo.

Entre os ensaios necessários para validar o projeto destaca-se o primeiro teste de energia ativa, onde foi possível medir a tensão, corrente e ângulo, também denominado de ensaio das grandezas de influência, o qual apresentou resultado bastante satisfatório, em função de que o medidor ao final do ensaio apresentou uma incerteza total de 1,6 % abaixo do valor determinado em norma e também do valor calculado neste trabalho.

A incerteza total calculada para o medidor foi 1,7328 % valor abaixo do estipulado em norma que atualmente é 2 %. Ficou claro que este valor calculado

[2] Técnica para utilizada em placas de circuito impresso para efetuar conexões que não foram previstas, utiliza um condutor elétrico ao invés da trilha.

ainda pode ser melhorado, uma vez que podem ser utilizados resistores mais precisos, com tolerâncias menores, na entrada do sinal de potencial do módulo de medição de potência. Bem como, o sensor de corrente por efeito *Hall,* pode ser substituído, sem nenhum prejuízo para o medidor, por um transformador de corrente com classe de exatidão de 0,3 %.

A continuação do presente trabalho será a sua calibração juntamente com a medição da energia reativa, aparente, tensão eficaz, corrente eficaz e de frequência. E como trabalho futuro a homologação do mesmo junto a órgãos credenciados ou acreditados pelo INMETRO.

REFERÊNCIAS

ANEEL. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional - PRODIST - Módulo 5 - Sistemas de Medição**, 2005. Disponivel em: <http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/Modulo5_20122005_R0.pdf>. Acesso em: 07 novembro 2015.

ANEEL. **Resolução Normativa Nº 414, de 9 de setembro de 2010**. Disponivel em: <http://www.aneel.gov.br/cedoc/ren2010414.pdf>. Acesso em: 20 setembro 2015.

BALBINOT, A.; BRUSAMARELLO, V. J. **Instrumentação e Fundamentos de Medidas**. Rio de Janeiro: LTC, v. 1, 2006.

BELCHIOR, F. N. **Cap. 6 - Transformadores para instrumentos**, 2014. Disponivel em: <http://www.gqee.unifei.edu.br/arquivos_upload/disciplinas/31/Cap.%206%20-%20Transformadores%20para%20Instrumentos.pdf>. Acesso em: 23 setembro 2015.

CERUTTI, F. **Comunicação de Dados e Redes de Computador**, 2005. Disponivel em: <http://inf.unisul.br/~cerutti/disciplinas/redes1/completas.pdf>. Acesso em: 10 outubro 2015.

CUNHA, J. **Desperdício consome 10 % da energia elétrica no país, diz associação**, 2015. Disponivel em: <http://www1.folha.uol.com.br/mercado/2015/02/1586778-desperdicio-consome-10-da-energia-eletrica-no-pais-diz-associacao.shtml>. Acesso em: 17 Agosto 2015.

ECONOMIA. **Custo de energia para a indústria no Brasil sobe em lista mundial, diz FIRJAN**, 2015. Disponivel em: <http://g1.globo.com/economia/noticia/2015/03/custo-de-energia-para-industria-no-brasil-sobe-em-lista-mundial-diz-firjan.html>. Acesso em: 16 Agosto 2015.

FILHO, S. D. M. **Medição de Energia Elétrica**. 4ª. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1997.

FLUKE. **Pinça Amperimétrica AC/DC i30**, 2015. Disponivel em: <http://www.fluke.com/fluke/brpt/acessorios/pincas-amperimetricas/i30.htm?pid=56292>. Acesso em: 22 outubro 2015.

FMR. **Redes Aula - 14**, 2005. Disponivel em: <www.fmr.edu.br/material/GSI/3_semestre/redes/Redes-aula12.doc>. Acesso em: 10 outubro 2015.

HADDAD, J. **Energia Elétrica:** Conceitos, Qualidade e Tarifação., 2004. Disponivel em: <http://www.mme.gov.br/documents/10584/1985241/Energ_Elet_Conceitos_Qualid_Tarif_Eletr_Procel-04.pdf>. Acesso em: 19 Setembro 2015.

HONEYWELL. **Hall Effect Sensing and Application**, 2015. Disponivel em: <http://sensing.honeywell.com/index.php?ci_id=47847>. Acesso em: 28 setembro 2015.

MAXIM INTEGRATED. **DS1307 - 64 x 8, Serial, I²C Real-Time Clock**, 2015. Disponivel em: <https://www.maximintegrated.com/en/products/digital/real-time-clocks/DS1307.html>. Acesso em: 27 outubro 2015.

MEGGER. **MPRT Series**, 2015. Disponivel em: <http://www.megger.com/us/products/ProductDetails.php?ID=2066&Description=#View MPRT8445_DS_en_NAFTA_V05.pdf>. Acesso em: 4 novembro 2015.

MICROCHIP. **PIC18F4620**, 2015. Disponivel em: <http://www.microchip.com/wwwproducts/Devices.aspx?dDocName=en010304>. Acesso em: 25 outubro 2015.

MÍNGUEZ, A. **Medidores de Energia Ativa, funcionamento, práticas usuais, principais ensaios e análise das fraudes mais comuns.**, 2007. Disponivel em: <http://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10000368.pdf>. Acesso em: 20 setembro 2015.

MINIPA. **CA-1000 Garras de Corrente**, 2015. Disponivel em: <http://www.minipa.com.br/8/108/214-Minipa-Garras-de-Corrente-CA-1000>. Acesso em: 4 novembro 2015.

NANSEN. **Medidores Eletromecânicos**, 2015. Disponivel em: <http://www.nansen.com.br/m1a-t-m2a-t,1,15>. Acesso em: 20 setembro 2015.

NXP. **UM10204 I2C bus specification and user manual**, 2014. Disponivel em: <http://www.nxp.com/documents/user_manual/UM10204.pdf>. Acesso em: 11 outubro 2015.

PHOENIX CONTACT. **Transdutor de corrente até 600 A – Suas vantagens em detalhe**, 2015. Disponivel em: <https://www.phoenixcontact.com/online/portal/br?1dmy&urile=wcm:path:/brpt/web/main/products/subcategory_pages/current_transducers_ac_dc_p-14-08-01/c9e1f551-9d33-4ab8-8c69-bd5a94336374/c9e1f551-9d33-4ab8-8c69-bd5a94336374>. Acesso em: 24 setembro 2015.

SACCO, F. **Comunicação *SPI***, 2014. Disponivel em: <http://www.embarcados.com.br/*SPI*-parte-1/>. Acesso em: 10 outubro 2015.

SAMED, M. et al. **Sistema de gestão energética**, 2012. Disponivel em: <http://www.osetoreletrico.com.br/web/publicidade/tabela-de-valores/896-sistema-de-gestao-energetica.html>. Acesso em: 17 Agostp 2015.

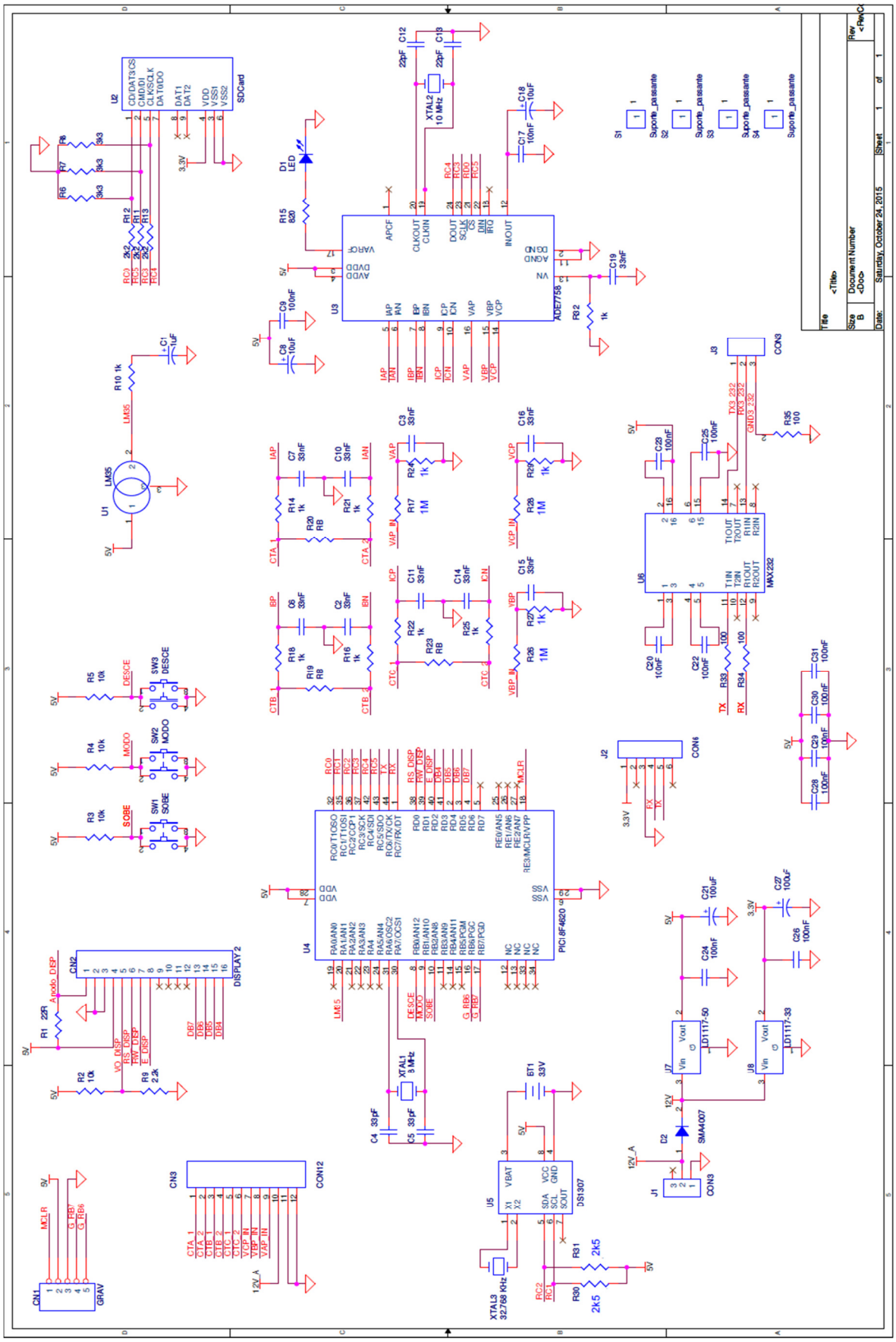
SIEMENS. **Multimedidor SENTRON PAC3100**, 2015. Disponivel em: <http://w3.siemens.com.br/buildingtechnologies/br/pt/produtos-baixa-tensao/gerenciamento-de-energia/instrumentos-de-medicao/powermeters/pac3100/Pages/Default.aspx>. Acesso em: 21 setembro 2015.

SOARES, G.; TOSTES, M. E.; SOARES, T. Portal O Setor Elétrico. **Melhor Aproveitamento da Energia Elétrica na Indústria**, 2014. Disponivel em: <http://www.osetoreletrico.com.br/web/publicidade/tabela-de-valores/1501-melhor-aproveitamento-da-energia-eletrica-na-industria.html>. Acesso em: 16 Agosto 2015.

SOUZA, D. J. **Desbravando o PIC Ampliado e Atualizado para o PIC16F628A**. 8ª. ed. São Paulo: Érica, 2005.

ANEXO A – TABELA 1 PRODIST

TABELA 1- Características Mínimas para os Sistemas de Medição

Classe de Acessante	Tensão de distribuição	Classe do TP	Classe do TC	Tipo do medidor	Classe do medidor	Incerteza Provável e%	Registros mínimos
Grupo B	BT	-	-	MEM A, MEM RO	2	2,0	KWh, kvarh opcional
Grupo B (com TC)	BT	-	0,6	MEM A, MEM RO	2	2,09	KWh, kvarh opcional
Grupo B (opcional)	BT	-	-	ME	2	2,0	KWh; kvarh opcional
Grupo B (com TC) (opcional)	BT	-	0,6	ME	2	2,09	KWh; kvarh opcional
Subgrupo B3 (irrigação) (existente)	BT	-	0,6	MEM A DR, MEM RO DR	2	2,09	KWh por segmento, kvarh por segmento opcional
Subgrupo B3 (irrigação) (opcional)	BT	-	0,6	ME 2Q	2	2,09	KWh por segmento, kvarh por segmento opcional
Subgrupo AS	BT	-	0,6	MEM A DM, MEM R	2	2,09	kW; kWh; kvarh
Subgrupo AS (opcional)	BT	-	0,6	ME	2	2,09	kW; kWh; kvarh
Subgrupo A4 (convencional) (existente)	MT	0,6	0,6	MEM A DM, MEM R	2	2,22	kW; kWh; kvarh
Subgrupo A4 (convencional)	MT	0,3	0,3	MEM A DM, MEM R	2	2,09	kW; kWh; kvarh
Subgrupo A4 (convencional) (opcional)	MT	0,3	0,3	ME	2	2,09	kW; kWh; kvarh
Subgrupo A4 (horo-sazonal) (existente)	MT	0,6	0,6	MEM A, MEM R, RD	2	2,22	kW; kWh; kvarh; UFER, DMCR, MM por segmento
Subgrupo A4 (horo-sazonal) (existente)	MT	0,6	0,6	ME2Q	2	2,22	kW; kWh; kvarh; UFER, DMCR, MM por segmento
Subgrupo A4 (horo-sazonal)	MT	0,3	0,3	ME 2 Q	1	1,14	kW; kWh; kvarh; UFER, DMCR, MM por segmento
Subgrupo A4 (consumidores livres)	MT	0,3	0,3	ME 2 Q	1	1,14	kW; kWh; kvarh; UFER, DMCR, MM por segmento
Subgrupo A4 (demais acessantes)	MT	0,3	0,3	ME 2 Q	1	1,14	kW; kWh; kvarh; MM

APÊNDICE A – CIRCUITO PARA MONTAGEM DA PLACA