



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

TITO LIVIO DE MIRANDA PINTO FILHO

**MEDIDOR ELETRÔNICO DE ENERGIA ELÉTRICA BIDIRECIONAL NÃO
INVASIVO**

FORTALEZA

2019

TITO LIVIO DE MIRANDA PINTO FILHO

**MEDIDOR ELETRÔNICO DE ENERGIA ELÉTRICA BIDIRECIONAL NÃO
INVASIVO**

Monografia apresentada ao Programa de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Ceará, como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica. Área de concentração: Sistemas de Energia.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Peixoto Praça.

FORTALEZA

2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- M646m Pinto Filho, Tito Livio de Miranda
 Medidor Eletrônico de Energia Elétrica Bidirecional Não Invasivo / Tito Livio de Miranda Pinto Filho. –
 2019.
 55 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia,
 Curso de Engenharia Elétrica, Fortaleza, 2019.
 Orientação: Prof. Dr. Paulo Peixoto Praça.
1. Medidores Eletrônicos de Energia. 2. Sistemas de Monitoramento. 3. MCP3909. 4. Bidirecional. I.
 Título.

CDD 621.3

TITO LIVIO DE MIRANDA PINTO FILHO

**MEDIDOR ELETRÔNICO DE ENERGIA ELÉTRICA BIDIRECIONAL NÃO
INVASIVO**

Monografia apresentada ao Programa de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Ceará, como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica. Área de concentração: Sistemas de Energia.

Aprovada em: ____/____/____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Paulo Peixoto Praça (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Fabrício Gonzalez Nogueira
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Luiz Henrique Silva Colado Barreto
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. MSc. Juliano de Oliveira Pacheco
Centro Universitário UniFanor (UNIFANOR)

Dedico este trabalho a meus pais,
Fátima e Tito, por acreditarem e
investirem em mim tornando tudo
isso possível.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, pelo dom da vida e pelas graças concedidas.

Agradeço a minha mãe, Fátima, meu pai, Tito Livio e minhas irmãs, Livia e Talita, por todo amor, carinho, paciência e suporte durante a jornada até aqui. Cada um de vocês fez parte e contribuiu de maneiras diferentes para esse sucesso. Sem vocês nada disso seria possível e, por isso, serei eternamente grato.

A minha namorada, Samanta, por tudo que fez por mim durante nosso caminho até aqui, toda ajuda, suporte, incentivo e principalmente amor. Você fez tudo ser mais fácil, e a você serei sempre grato. Agradeço também a toda sua família, por me acolherem, apoiarem e serem sempre carinhosos comigo, desejando sempre meu sucesso.

A minha avó, Ester, meu avô, Mario, por tudo que fizeram pela família enquanto vivos, por todos os ensinamentos, momentos compartilhados, por cada mimo e instrução. Vocês foram seres de luz e puderam iluminar o caminho de todos ao seu redor. A vocês, eternas saudades e gratidão.

A Universidade Federal do Ceará, por todas as oportunidades concedidas, por todo conhecimento adquirido através dessa instituição. A todos os professores que fizeram parte dessa trajetória, por toda a orientação e ajuda nos momentos necessários. Agradecimento especial ao meu orientador Dr. Paulo Peixoto Praça, aos professores Dr. Fabrício Gonzalez Nogueira, Dr. Luiz Henrique Silva Colado Barreto (UFC) e MSc. Juliano de Oliveira Pacheco (UNIFANOR) por participarem dessa banca avaliadora.

Aos meu amigos e colegas de curso por toda ajuda, por compartilharem momentos difíceis e momentos felizes, o caminho sem vocês certamente não teria sido o mesmo.

Por fim, a todos que fizeram parte da trajetória até aqui, que influíram de alguma maneira, seja tecnicamente ou pessoalmente.

“O dom do poder mental vem de Deus, o Ser Divino, e se concentrarmos nossas mentes na verdade, ficamos em sintonia com este grande poder. ”

(Nikola Tesla)

“Procure ser um homem de valor, em vez de ser um homem de sucesso. ”

(Albert Einstein)

RESUMO

Com os constantes avanços tecnológicos, a necessidade diária do consumo de energia elétrica tem aumentado, tornando-se interessante o desenvolvimento de tecnologias que permitam ao usuário monitorar grandezas elétricas instantâneas e até relatórios de consumo mensais, acompanhando de maneira rápida e precisa detalhes do seu consumo de energia, podendo então administrar de maneira mais eficaz sua demanda de energia. Neste contexto, este presente trabalho apresenta o desenvolvimento de um medidor eletrônico de energia bidirecional não invasivo, que permite ao usuário realizar o monitoramento do seu consumo de energia, demanda, além de possíveis falhas. Para o desenvolvimento do projeto foram utilizados o circuito integrado de medição MCP3909, responsável pela captação das grandezas elétricas, um microcontrolador ATmega328 associado ao sistema Arduino Nano e um *display* de cristal líquido. O projeto do medidor segue as recomendações dos fabricantes de circuitos integrados e placas de circuito da Microchip, Analog Devices e Texas Instruments. Neste trabalho são apresentados os resultados obtidos no desenvolvimento do protótipo do medidor, bem como todas as considerações tomadas para o desenvolvimento do mesmo, apresentando cálculos, estimativas, rendimentos finais e possíveis aprimoramentos para o sistema, cada qual descrito em seu respectivo tópico.

Palavras-chave: Medidores de Energia, MCP3909, Monitoramento, Bidirecional.

ABSTRACT

With the constant technological advancements, the daily necessity for electrical energy has been growing, thus, it has become important the development of technologies which allows the end user to monitor instant electrical values and even monthly consumption, allowing him, quickly and precisely, to keep up with details of his energy consumption. In view of that advancement, this work proposes the development of a non-invasive bidirectional electronic energy meter, allowing the user to monitor its energy consumption, demand and possible failures. For the project development it has been used the measuring integrated circuit MCP3909 responsible by capturing the electrical measurements, a microcontroller ATmega328 associated with the Arduino Nano board and a liquid crystal display. The meter design follows recommendations of integrated circuits and circuit boards manufacturers from Microchip, Analog Devices and Texas Instruments. In this work the meter prototype results obtained during the development, are going to be presented. All the considerations, methodology, calculations, final results as well as the possible improvements are described in its respective topics.

Key-Words: Energy Meters, MCP3909, Monitoring, Bidirectional.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Sistema Proposto.....	15
Figura 2.1 – Medidor de Lâmpada-Hora.....	17
Figura 2.2 – Medidor Eletromecânico.....	18
Figura 2.3 – Medidores Eletrônicos.....	19
Figura 2.4 – Medidor Eletrônico Inteligente (Smart Meter).....	19
Figura 2.5 - Princípio de Funcionamento do Medidor Eletrônico.....	20
Figura 2.6 – Quadrantes do Fluxo de Potência.....	24
Figura 2.7 – Curva de Potência para Intervalos de Demanda.....	26
Figura 3.1 – Arduino NANO.....	28
Figura 3.2 – Diagrama de Pinos do MCP3909.....	29
Figura 3.3 – Princípio de Funcionamento do MCP3909.....	31
Figura 3.4 – Sinal Diferencial Máximo do Canal de Tensão.....	32
Figura 3.5 – Amplificador Diferencial de Ganho Não Programável.....	33
Figura 3.6 – Malha de Calibração.....	34
Figura 3.7 – Malha de Calibração Final.....	34
Figura 3.8 – Sinal Diferencial Máximo do Canal de Corrente.....	35
Figura 3.9 – Transformador de Corrente Utilizado.....	36
Figura 3.10 – Amplificador Diferencial de Ganho Programável.....	37
Figura 3.11 – Esquemático da Fonte de Alimentação.....	38
Figura 3.12 – Formas de Onda Obtidas na Fonte.....	38
Figura 3.13 – Diagrama Operacional DS3231.....	39
Figura 3.14 – Sistema de Aquisição.....	40
Figura 3.15 – Tratamento e Exibição de Dados.....	40
Figura 3.16 – Diagrama Funcional do Medidor.....	41
Figura 3.17 – Fluxograma de Firmware.....	42
Figura 3.18 – Adaptação de Encapsulamento.....	43
Figura 3.19 – PCB Completa de Medição.....	43
Figura 4.1– Montagem do Sistema Completo.....	44
Figura 4.2– Bancada Utilizada.....	44
Figura 4.3– Exemplo de Coleta de Resultados.....	46
Figura 4.4– Display de Data e Hora.....	47
Figura 4.5– Display de Energias.....	47
Figura 4.6– Display de Demandas.....	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Comparação entre Medidores Eletromecânicos e Eletrônicos.	20
Tabela 2.2 - Sentido do Fluxo por Quadrante	24
Tabela 2.3 - Tipo de Potência por Quadrante	24
Tabela 2.4 – Limites de Erro Percentual para Medidores de Energia Ativa	27
Tabela 2.5– Limites de Erro Percentual para Medidores de Energia Reativa	27
Tabela 3.1 – Descrição das Funções dos Pinos do CI	30
Tabela 3.2 – Seleção de Ganhos do Canal.....	35
Tabela 4.1– Erros Percentuais do Medidor	45

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Contextualização e motivação.....	14
1.2	Trabalho proposto.....	14
1.3	Estrutura do trabalho	15
2	MEDIDORES DE ENERGIA	17
2.1	Contexto histórico	17
2.2	Princípio de Funcionamento	20
2.2.1	<i>Transdutores de Tensão</i>	21
2.2.2	<i>Transdutores de Corrente</i>	21
2.2.3	<i>Condicionamento do Sinal</i>	22
2.3	Potência e Energia.....	22
2.4	Fluxo de Potência	23
2.5	Tipos de Medidores	25
2.5.1	<i>Medidores Bidirecionais</i>	25
2.5.2	<i>Medidores Unidirecionais</i>	25
2.5.3	<i>Medidores Catraca</i>	25
2.6	Demanda de Energia.....	25
2.7	Classes de Exatidão	26
3	DESENVOLVIMENTO DO MEDIDOR	28
3.1	Arduino	28
3.2	Circuito Integrado de Medição MCP3909	29
3.2.1	<i>Princípio de Funcionamento do MCP3909</i>	31
3.3	Circuito de Medição de Tensão.....	32
3.3.1	<i>Calibração Utilizada</i>	34
3.4	Circuito de Medição de Corrente	35
3.5	Fonte de Alimentação	37
3.6	Display LCD	38
3.7	Real Time Clock DS3231	39
3.8	Medidor Desenvolvido	39
3.9	Firmware.....	41
3.10	Confecção da PCB.....	42
4	IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA.....	44

5	CONCLUSÃO	49
5.1	Sugestões para trabalhos futuros.....	50
	REFERÊNCIAS	51
	APÊNDICE A – CÓDIGO FONTE EM INO PARA O FIRMWARE.....	53

1 INTRODUÇÃO

Com o desenvolvimento e modernização da sociedade, cada vez mais nos tornamos dependentes de energia elétrica, necessitando constantemente aprimorar técnicas relacionadas a geração, transmissão, distribuição e medição de energia elétrica (FURLAN, 2018).

Devido a dependência dessa energia devemos nos aprimorar em como gerir o uso da mesma de maneira sustentável, aliviando os sistemas de energia e, conseqüentemente, reduzindo a demanda das matérias primas, que muitas vezes são recursos não renováveis.

1.1 Contextualização e motivação.

Sistemas de gerenciamento de energia vem sendo implantados cada vez mais, principalmente devido a diminuição dos custos relacionados aos sistemas embarcados para tal, entretanto, a viabilização da implantação desses sistemas para consumidores do grupo B ainda não é tão alta, visto que a estrutura tarifária do mesmo não permite grandes vantagens com relação a esses investimentos (AQUINO, 2018).

Contudo, a quantidade de consumidores residenciais dentro da matriz energética nacional vem se tornando cada vez mais relevante, correspondendo a 29% em 2017, relativo a um consumo de 134.368 GWh segundo dados do EPE (EPE, 2018). Com a implantação da nova modalidade tarifária, a tarifa branca, o gerenciamento por parte destes consumidores de energia torna-se ainda mais interessante, sendo esse um novo nicho de oportunidades para investimento de projetos.

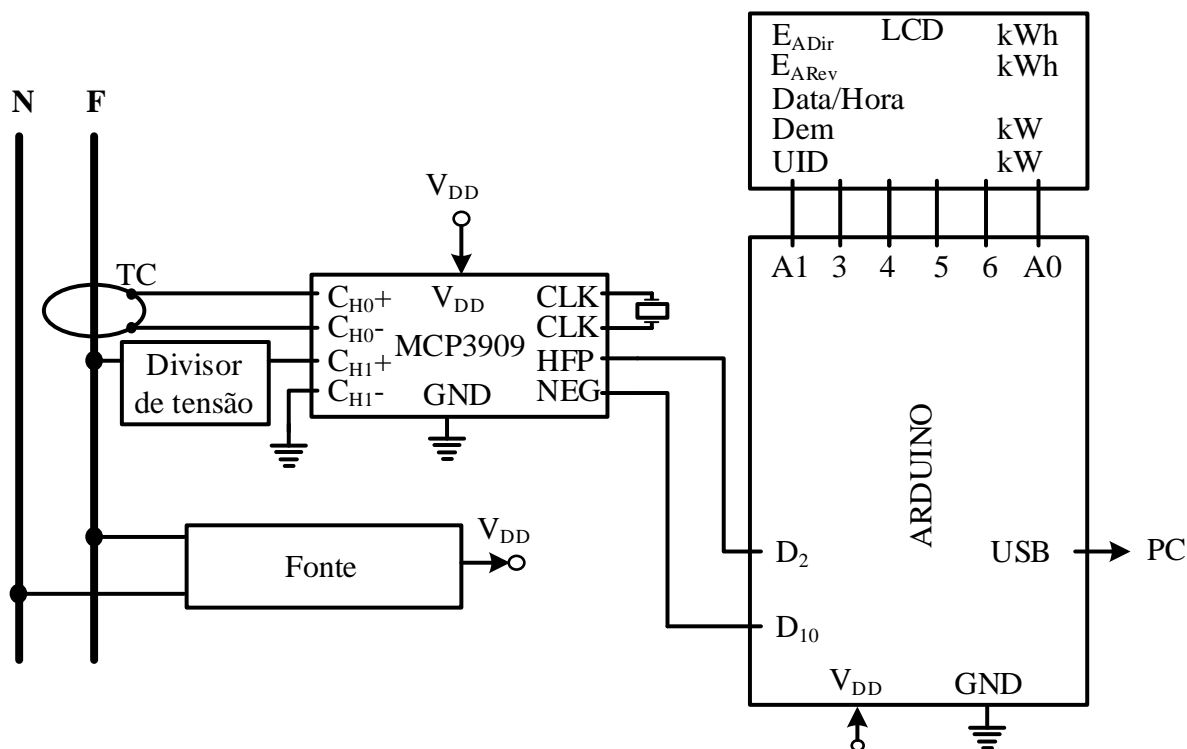
Dada a crescente importância da evolução constante dos sistemas de medição e gerenciamento de energia, desenvolveu-se com este trabalho de conclusão de curso um medidor eletrônico, não invasivo, capaz de mostrar grandezas elétricas instantâneas tais como: tensão, corrente, potência ativa, medir energia elétrica e demanda de energia.

1.2 Trabalho proposto

O presente trabalho apresenta o desenvolvimento de um medidor eletrônico de energia não invasivo para medição de grandezas elétricas e monitoramento de consumo de energia elétrica. O medidor faz uso de um CI (Circuito Integrado) MCP3909, responsável por realizar a medição das grandezas elétricas a serem processadas pelo microcontrolador escolhido, neste caso, um ATmega328 associado a um Arduino Nano.

Para tal, serão monitoradas as entradas de tensão e corrente da carga a ser medida. Estes sinais captados serão tratados por meio de filtros, lidos pelo CI e enviados em forma de pulsos para o microcontrolador. Este último exibirá através de um display de LCD as grandezas elétricas referentes aquela medição, bem como, contabilizar a energia consumida pela carga associada. O sistema proposto pode ser visualizado na Figura 1.1.

Figura 1.1 – Sistema Proposto



Fonte: Adaptado de MICROCHIP (2012).

1.3 Estrutura do trabalho

Este trabalho está organizado em cinco capítulos, onde o primeiro, já apresentado, trata-se de uma introdução acerca do projeto, e os demais estão sucintamente descritos abaixo.

Capítulo 2 – Medição de Energia. Neste tópico será realizada uma abordagem teórica a respeito de medição de energia, bem como apresentada a evolução histórica dos medidores.

Capítulo 3 – Desenvolvimento do Medidor. Este tópico abordará o desenvolvimento do projeto, expondo metodologias, materiais e técnicas utilizadas no mesmo, bem como, uma explanação dos métodos de medição de corrente e tensão e de técnicas de aquisição de grandezas analógicas e supressão de ruídos.

Capítulo 4 – Resultados Obtidos. Apresentar-se-ão os resultados obtidos durante o período de desenvolvimento do projeto.

Capítulo 5 – Conclusão. Por fim, serão discutidos os resultados obtidos com base no propósito do presente documento e apresentadas sugestões de aprimoramento para futuros trabalhos.

2 MEDIDORES DE ENERGIA

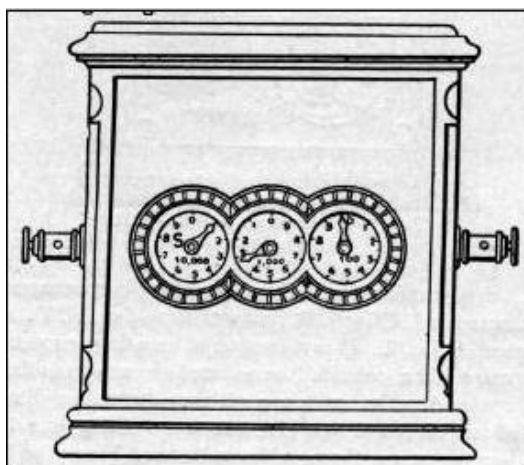
A medição de energia é de extrema importância para os sistemas atuais de monitoramento e faturamento. Leituras precisas são necessárias para que não haja prejuízos tanto para concessionárias quanto para consumidores.

Sistemas de monitoramento de energia vem ganhando papel importante na atual condição dos consumidores, que cada vez mais vem querendo acompanhar e controlar seu consumo de energia.

2.1 Contexto histórico

O conceito de medição de energia começa junto com a evolução dos sistemas de iluminação baseados no uso de corrente contínua. Um dos primeiros medidores conhecidos foi o medidor de Gardiner de 1872, o sistema contava apenas com um relógio, que era ligado ou desligado conforme havia uma entrada de carga, isso graças a um ímã conectado em série com a mesma, criando-se inclusive o conceito de lâmpada-hora. A medição nesse formato era possível dada a dificuldade na conexão de mais de um circuito de iluminação, ou seja, cada lâmpada era conectada a apenas uma chave. Com o advento da lâmpada de bulbo, onde era mais fácil realizar a divisão de circuitos, o medidor ficou obsoleto. (DAHLE, 2010).

Figura 2.1 – Medidor de Lâmpada-Hora.



Fonte: DAHLE (2010)

Com os avanços das cargas e do conhecimento a respeito do comportamento de circuitos magnéticos em corrente alternada dadas as descobertas de Tesla, junto a nova implantação dos sistemas de distribuição em CA surgiram os medidores eletromecânicos.

Esses medidores são compostos por um elemento motor dividido em dois circuitos magnéticos, um de corrente e outro de potencial, de onde a resultante do campo magnético de

ambos é proporcional a tensão e corrente as quais os mesmos são submetidos. Além dos já mencionados circuitos, existe um disco suspenso, cujo comportamento, conforme se fornece corrente ao circuito magnético, é a rotação em seu próprio eixo. Já que com campo magnético incidente nele, correntes parasitas serão induzidas, tais rotações são proporcionais a energia consumida (FERREIRA, 2012). O grande agravante no uso desse tipo de medidores, além de erros percentuais na faixa de $\pm 2\%$, é sua susceptibilidade a interferência em operações em corrente contínua, causada por deformações nos fluxos magnéticos. Além disso, são medidores grandes que necessitam operar em uma posição vertical fixa. Existem também perdas adicionais devido ao atrito do conjunto mecânico, sendo estas significativas quando a potência do circuito está muito baixa.

Figura 2.2 – Medidor Eletromecânico



Fonte: DAHLE (2010).

Devido aos empecilhos relacionados ao uso dos medidores eletromecânicos e com a evolução da eletrônica permitindo que ela fosse utilizada de maneira mais barata e segura, os medidores eletromecânicos que até o momento vinham dominando o mercado perderam espaço para os medidores de energia eletrônicos.

Medidores eletrônicos possuem classes distintas de exatidão que podem chegar a níveis inferiores a 0,2% quando realizando medição de ativos, além de possuírem grande facilidade na implantação de novas funcionalidades e menores custos de produção quando comparados a seus predecessores (DOURADO, 2018).

Figura 2.3 – Medidores Eletrônicos



Fonte: ELETRA (2019)

Com o aperfeiçoamento das tecnologias em sistemas embarcados tornou-se possível maiores aprimoramentos nos sistemas de medição, dando surgimento aos medidores inteligentes, onde não somente é possível realizar leituras de energia e grandezas elétricas como é oferecida também a possibilidade de comunicação local e remota, a adição de indicadores de qualidade de energia, corte e religamento via relé interno, alarmes e ainda eventos antifraude segundo dados do fabricante.

Figura 2.4 – Medidor Eletrônico Inteligente (Smart Meter)



Fonte: ELETRA (2019).

Na Tabela 2.1 é possível avaliar uma pequena comparação entre as características dos medidores eletromecânicos e eletrônicos.

Tabela 2.1 - Comparação entre Medidores Eletromecânicos e Eletrônicos.

Característica	Eletromecânico	Eletrônico	Benefícios do medidor eletrônico
Classe de exatidão	2,00%	$\leq 1,00\%$	Melhor exatidão
Sensibilidade	100 mA	40 mA	Mais sensível
Ângulo de instalação	Vertical	Qualquer	Menor risco de fraude
Rigidez das partes mecânicas	Baixa	Alta	Mais resistente a impactos
Calibração	Mecânica	Malha resistiva	Não susceptibilidade a problemas mecânicos
Saída de pulso	Inexistente	Existente	Leitura de exatidão simplificada

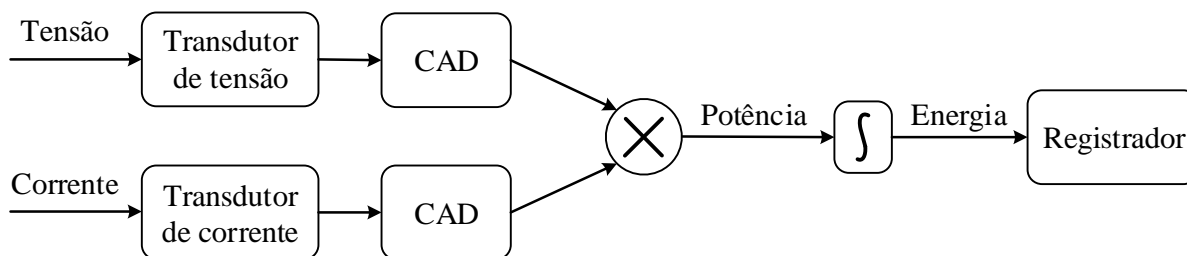
Fonte: Adaptado de DOURADO (2018).

No presente trabalho, as explanações serão focadas nos medidores eletrônicos.

2.2 Princípio de Funcionamento

Os medidores eletrônicos de energia funcionam com base na medição feita por sensores associados a transdutores, que obtém valores de corrente e potencial a partir de sinais de entrada. Os valores obtidos são então multiplicados, obtendo-se a potência instantânea, e por seguinte integrados, para obtenção da energia. Uma vez que a energia é integralizada ela é então registrada.

Figura 2.5 - Princípio de Funcionamento do Medidor Eletrônico.



Fonte: Adaptado de NICOLAU (2013).

Para realizar a medição faz-se necessária a utilização de transdutores como mencionado anteriormente, de modo a diminuir os sinais a níveis aceitáveis para os circuitos integrados de medição ou microcontroladores. Transdutores são conversores de sinais de parâmetro (corrente, tensão, resistência, temperatura) em valores proporcionais de tensão, ou

seja, são capazes de captar energia de um sistema e fornecer para outro sistema sem nenhuma perda das características da energia do sistema de entrada (GRAHAM et al., 2014). Para tal existem algumas técnicas e dispositivos que serão explanadas posteriormente neste documento.

2.2.1 Transdutores de Tensão

Os transdutores de tensão mais comumente utilizados são os transformadores de potencial e as malhas resistivas.

Os transformadores de tensão, também conhecidos como transformadores de potencial (TP), são instrumentos desenvolvidos para controle e medição de potencial elétrico. São utilizados com intuito de reduzir a tensão primária do sistema a níveis aceitáveis para o dispositivo de medição sendo altamente precisos e normalmente referidos pela sua relação de transformação, por exemplo, 60:1 indicando que a cada 60 volts no primário tem-se 1 volt no secundário (GRAHAM et al., 2014).

As malhas resistivas consistem em uma certa quantidade de resistores em série de modo a propiciar uma queda de tensão suficientemente grande para que o potencial ao fim da malha seja proporcionalmente inferior ao valor de entrada.

2.2.2 Transdutores de Corrente

Os transdutores de corrente mais comumente utilizados são os transformadores de corrente e os resistores shunt.

Os transformadores de corrente (TC) têm seu design desenvolvidos para controle e medição de corrente elétrica. Consistem de dois enrolamentos, o primário pode ser do tipo barra ou bobina única e é conectado em série com a carga. São utilizados com intuito de reduzir a corrente do sistema primário, através de uma relação conhecida, para um nível de corrente aceitável para o dispositivo de medição, sendo altamente precisos e normalmente referidos pela sua relação nominal, como exemplo, 400:5 A (GRAHAM et al., 2014).

Shunts são resistores com construção especial que permitem que tensões proporcionais a corrente que o circulam sejam medidas segundo a lei de Ohm ($V = RI$). Vale ressaltar que resistores shunt não proporcionam nenhuma isolamento entre os sistemas primário e secundário (GRAHAM et al., 2014).

O uso de resistores shunt é de grande importância nos sistemas de medição de corrente, já que, mesmo quando é feita a utilização de TC no sistema seu uso é necessário, isso ocorre porque as interpretações realizadas por microcontroladores e circuitos integrados são

feitas através de sinais de tensão, dito isto, a corrente secundária dos transformadores de corrente deve sempre ser convertida em um potencial de modo a ser avaliada.

2.2.3 Condicionamento do Sinal

Trata-se do tratamento de um sinal de modo a garantir que o mesmo esteja em níveis satisfatórios para utilização.

O condicionamento de um sinal pode provir ganho ou filtragem deste, podendo ser feito de maneira discreta, via amplificadores operacionais de alta precisão, ou serem integradas a CIs que possuem todas as ferramentas analógicas e digitais para o processamento correto desses sinais (GRAHAM et al., 2014).

Deve-se ressaltar que cada sensor demanda um tratamento específico do seu sinal, sejam eles, amplificar, filtrar ou equalizar, levando em consideração que mais de um desses pode ocorrer ao mesmo tempo de modo a obter um ganho de nível com boa relação de sinal/ruído e baixos níveis de distorção harmônica (BRITO, 2016).

2.3 Potência e Energia

Potência é a variação no tempo de um gasto ou absorção de energia (NILSSON; RIEDEL, 2009), sendo definida em termos instantâneos pela equação (2.1).

$$p(t) = v(t) \cdot i(t) \quad (2.1)$$

No caso de sistemas em corrente alternada senoidal, que é o utilizado nas redes de distribuição, existem duas parcelas de potência que constituem a potência total de um sistema, sendo elas as potências ativa e reativa, resultando na potência aparente. As equações (2.2), (2.3) e (2.4) representam as potências ativa, reativa e aparente, respectivamente, em sistemas monofásicos.

$$P = V_{rms} \cdot I_{rms} \cos(\theta) \quad (2.2)$$

$$Q = V_{rms} \cdot I_{rms} \sin(\theta) \quad (2.3)$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \angle \tan^{-1}\left(\frac{Q}{P}\right) \quad (2.4)$$

Onde θ é o ângulo de defasagem entre os sinais de tensão e corrente do sistema, e o cosseno deste é chamado fator de potência de deslocamento.

A potência ativa (P) é responsável pela realização de trabalho útil, estando também associada às perdas joulicas do sistema, isto é, perdas térmicas. A unidade de P é o Watt (W).

A potência reativa (Q) não produz trabalho útil, entretanto flui entre carga e geração adicionando perdas magnéticas aos sistemas, estando associada matematicamente à parte imaginária da potência aparente. A unidade de Q é o volt ampère reativo (VAr). É interessante salientar que o valor médio da potência reativa é nulo, sendo ela, portanto, oscilante no tempo.

A potência aparente (S) é a potência total que circula no sistema. Sua unidade é o volt ampère (VA).

No caso de sistemas polifásicos têm-se a somatória das potências em cada uma das fases para determinar a potência total. Já em sistemas não-senoidais o valor de potência pode ser obtido através do somatório de todas as componentes harmônicas do sistema para cada uma das definições de potência.

Como mencionado anteriormente, a potência é a variação no tempo de um gasto ou absorção de energia. Logo, para obtenção da energia em um sistema (e), considera-se a distribuição da potência no tempo, podendo ser definida matematicamente com a equação (2.5).

$$e = \int_0^T p(t) \cdot dt \quad (2.5)$$

Em termos de potência média definimos energia (E) em função da potência ativa, conforme mostra a equação (2.6), pois o somatório da potência reativa durante um período da rede é nulo.

$$E = P \cdot \Delta t \quad (2.6)$$

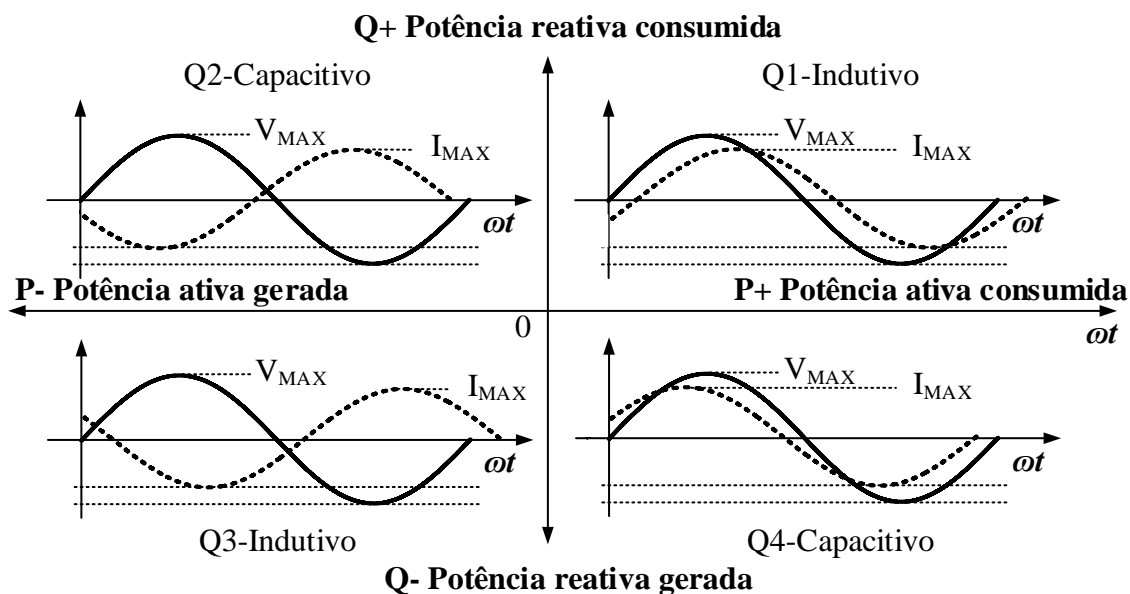
2.4 Fluxo de Potência

Para definição de fluxo de potência se faz necessário entender melhor o fator de potência de deslocamento. O fator de potência (FP) representa uma relação entre a potência útil e a potência aparente em determinado sistema, é definido matematicamente pela equação (2.7).

$$FP = \frac{P}{|S|} = \cos(\theta) \quad (2.7)$$

Dito isto é possível definir fluxo de potência como sendo o sentido da circulação de potência em um sistema. O sentido desse fluxo depende diretamente do ângulo de defasagem entre tensão e corrente de maneira que cada quadrante trigonométrico representará uma combinação diferente dos fluxos de potência ativa e reativa. Uma síntese dessas características pode ser vista na Figura 2.6.

Figura 2.6 – Quadrantes do Fluxo de Potência



Fonte: Adaptado de DOURADO (2018).

Quando a potência flui da fonte para a carga, ou seja, quando a potência é consumida pela carga, considera-se que a potência é ativa ou reativa direta, quando flui da carga para a fonte, ou seja, quando a potência é fornecida pela carga, tem-se potência ativa ou reativa reversa.

As tabelas Tabela 2.2 e Tabela 2.3 apresentam um resumo do sentido dos fluxos e as características de cada um deles.

Tabela 2.2 - Sentido do Fluxo por Quadrante

Característica da Potência	Direta	Reversa
Ativa	Q1, Q4 ($271^\circ \rightarrow 1^\circ$)	Q2, Q3 ($91^\circ \rightarrow 269^\circ$)
Reativa	Q1, Q4 ($271^\circ \rightarrow 1^\circ$)	Q2, Q3 ($91^\circ \rightarrow 269^\circ$)

Fonte: Próprio autor

Tabela 2.3 - Tipo de Potência por Quadrante

Característica da Potência	Direta	Reversa
Indutiva	Q1 ($1^\circ \rightarrow 89^\circ$)	Q3 ($181^\circ \rightarrow 269^\circ$)
Capacitiva	Q4 ($271^\circ \rightarrow 359^\circ$)	Q2 ($91^\circ \rightarrow 179^\circ$)

Fonte: Próprio autor

Vale ressaltar que para os ângulos precisamente sobre o eixo das abscissas ($0^\circ/360^\circ$ e 180°) e do eixo das ordenadas (90° e 270°) não é possível definir o quadrante ao qual a energia

se encontra, define-se portanto que a mesma está em flutuação entre quadrantes (DOURADO, 2018). Apesar disso, em condições ideais é possível estimar que exatamente sobre o eixo das abscissas a potência é puramente ativa, e no eixo das ordenadas ela é puramente reativa.

2.5 Tipos de Medidores

Os medidores de energia elétrica podem apresentar três tipos diferentes de características, relacionadas a como eles computam a energia, dependendo do sentido do fluxo de potência. Podendo estes serem do tipo bidirecional, unidirecional ou catraca.

2.5.1 Medidores Bidirecionais

Medidores bidirecionais são medidores capazes de computar a energia em registradores específicos independentemente do sentido do fluxo de potência. Esse tipo de medidor possui, portanto, um registrador diferente para energias diretas e reversas, sejam elas, ativas ou reativas. São comumente utilizados em setores onde a análise do sentido do fluxo é importante, como exemplo, consumidores que possuam geração de energia.

2.5.2 Medidores Unidirecionais

Medidores Unidirecionais são medidores que computam a energia em registradores de energia direta independentemente do sentido do fluxo de potência. Esse tipo de medidor possui, portanto, um registrador único para energias diretas e reversas, sejam elas, ativas ou reativas. Qualquer fluxo de potência reversa será computado no seu respectivo registrador de energia direta, por exemplo, em um caso onde haja energia ativa reversa ela será computada no registrador de energia ativa direta, o mesmo vale para energia reativa. O exemplo mais comum desse tipo de medidor são os medidores residenciais convencionais.

2.5.3 Medidores Catraca

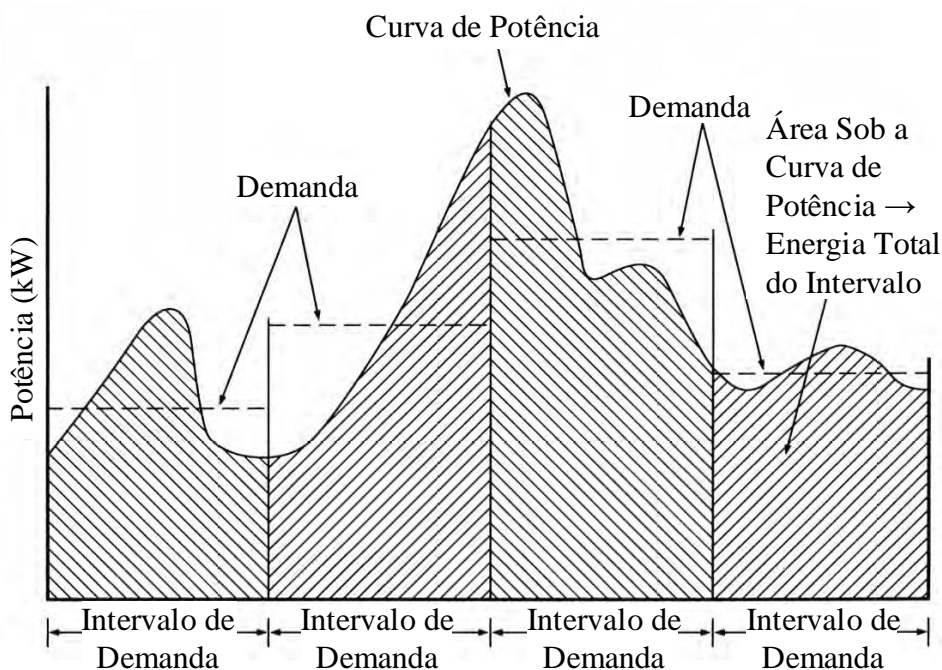
Medidores Catraca são medidores que computam energia apenas em registradores de energia direta independentemente do sentido do fluxo de potência. Esse tipo de medidor, portanto, ignora qualquer potência que esteja nos quadrantes reversos, sejam elas, ativas ou reativas. São medidores pouco utilizados comercialmente.

2.6 Demanda de Energia

A demanda é dada pelo valor médio de potência, e está relacionada diretamente a um período de tempo pré-definido (GRAHAM et al., 2014). Segundo resolução normativa da ANEEL o intervalo de demanda medida a ser utilizado no Brasil é de 15 minutos, essa demanda

deve ser a maior demanda de potência no intervalo, sendo esta verificada por medição (ANEEL, 2010). A demanda pode ser interpretada como sendo os valores amostrados em intervalos definidos dentro de certa curva de potência, ela é exatamente igual a área da curva de potência dentro do intervalo fixado de aquisição. A Figura 2.7 permite compreender melhor como funciona o tratamento dos valores de demanda.

Figura 2.7 – Curva de Potência para Intervalos de Demanda



Fonte: Adaptado de GRAHAM et al. (2014)

2.7 Classes de Exatidão

O Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (Inmetro), estabelece condições mínimas de operação para medidores de energia, estas são tratadas na Regulação Técnico Metrológico (RTM) 587 (INMETRO, 2012), nesta tem-se descrito limites de operação e características a serem seguidas para implantação de um medidor de energia no mercado.

Um dos itens abordados define os limites de erro percentual dos medidores, de modo a aloca-los em categorias pré-definidas. Para este projeto serão analisadas duas condições de operação descritas pela RTM, essas podem ser vistas nas tabelas Tabela 2.4 e Tabela 2.5.

Tabela 2.4 – Limites de Erro Percentual para Medidores de Energia Ativa

In (%)	$\cos(\theta)$	Índice de Classe e respectivos erros percentuais			
		A	B	C	D
10	1	$\pm 2,0$	$\pm 1,0$	$\pm 0,5$	$\pm 0,2$
100	1	$\pm 2,0$	$\pm 1,0$	$\pm 0,5$	$\pm 0,2$
100	0,5 Indutivo	$\pm 2,0$	$\pm 1,0$	$\pm 0,5$	$\pm 0,2$
100	0,8 Capacitivo	$\pm 2,0$	$\pm 1,0$	$\pm 0,5$	$\pm 0,2$

Fonte: Adaptado de INMETRO (2012)

Tabela 2.5– Limites de Erro Percentual para Medidores de Energia Reativa

In (%)	$\sin(\theta)$	Índice de Classe e respectivos erros percentuais			
		A	B	C	D
10	1	$\pm 4,0$	$\pm 2,0$	$\pm 1,0$	$\pm 0,4$
100	1	$\pm 4,0$	$\pm 2,0$	$\pm 1,0$	$\pm 0,4$
100	0,5 Indutivo	$\pm 4,0$	$\pm 2,0$	$\pm 1,2$	$\pm 0,6$
100	0,8 Capacitivo	$\pm 4,0$	$\pm 2,0$	$\pm 1,2$	$\pm 0,6$

Fonte: Adaptado de INMETRO (2012)

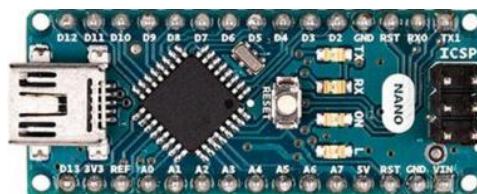
3 DESENVOLVIMENTO DO MEDIDOR

Será abordado nesse capítulo o sistema de medição de energia desenvolvido, composto por uma fonte de alimentação, um circuito de processamento de sinal e um microcontrolador.

3.1 Arduino

O Arduino é uma plataforma de desenvolvimento livre e de grande simplicidade em sua utilização devido as diversas bibliotecas disponíveis. Além disso, o Arduino conta com uma interface de desenvolvimento (IDE) bastante intuitiva e completa, agilizando o desenvolvimento de protótipos. Neste projeto optou-se por utilizar um Arduino modelo NANO, devido principalmente ao seu tamanho. No caso de uma implementação posterior, o modelo nano oferece um tamanho aceitável para prototipagem. Na Figura 3.1 pode-se ver um Arduino NANO.

Figura 3.1 – Arduino NANO



Fonte: ARDUINO (2019)

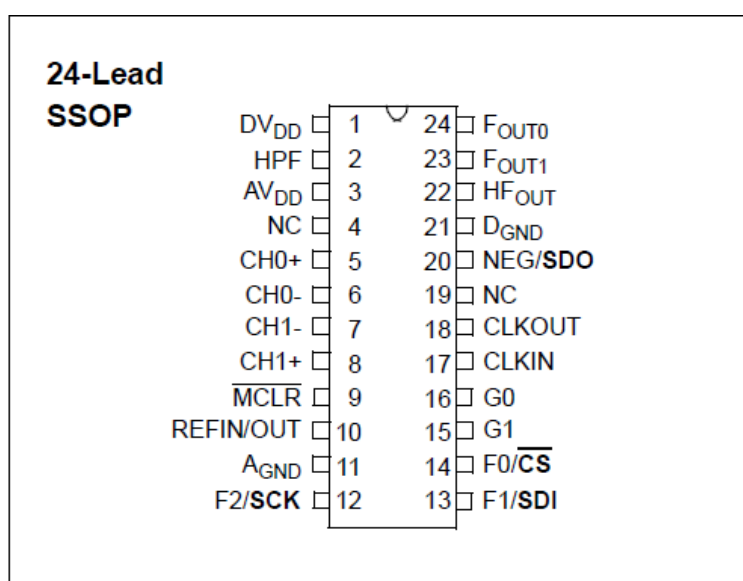
O Arduino escolhido conta com um microcontrolador ATmega328 que utiliza da arquitetura AVR. O controlador possui memória flash de 32 kB, sendo 2 kB consumidos pelo *bootloader* do próprio controlador. Possui SRAM de 2 kB e frequência de operação de 16 MHz através de um cristal de quartzo. A plataforma possui 22 pinos de I/O onde 8 possuem funções analógicas e seis deles fornecem saída de PWM (*Pulse Width Modulation*). A plataforma oferece também uma entrada mini-USB para comunicação e gravação direto no PC e uma saída ICSP (*In-Circuit Serial Programming*) que permite a gravação de novo firmware diretamente dentro do circuito.

A EEPROM (*Electrically-Erasable Programmable Read-Only*) do Arduino, local onde serão armazenados os valores de energia lidos pelo medidor, é limitada e fornece em torno de 100000 gravações com sucesso garantido, após isso, os salvamentos podem se tornar incertos (DOURADO, 2018).

3.2 Circuito Integrado de Medição MCP3909

O MCP3909 é um CI de medição de energia desenvolvido com suporte aos padrões internacionais de medição IEC-62053. Possui uma saída de pulso proporcional a potência ativa média, com acesso serial simultâneo aos canais do ADC e saída com multiplicador de dados, com erros típicos de no máximo 0,1% para certos tipos de carga. Possui interface SPI permitindo acesso as formas de onda dos canais de medição (MICROCHIP, 2012). Na Figura 3.2 é possível verificar os pinos do CI.

Figura 3.2 – Diagrama de Pinos do MCP3909



Fonte: MICROCHIP (2012)

Na Tabela 3.1 é apresentada uma breve explanação a respeito dos pinos do CI.

Tabela 3.1 – Descrição das Funções dos Pinos do CI

MCP3909 SSOP	Símbolo	Descrição
1	DV _{DD}	Pino de alimentação digital
2	HPF	Pino de controle do filtro passa alta
3	AV _{DD}	Pino de alimentação analógica
4	NC	Não conectado
5	CH0+	Pino de entrada analógica não-inversora para o canal 0 (canal de corrente)
6	CH0-	Pino de entrada analógica inversora para o canal 0
7	CH1-	Pino de entrada analógica inversora para o canal 1 (canal de tensão)
8	CH1+	Pino de entrada analógica não-inversora para o canal 1
9	MCLR	Pino de entrada de controle do master clear
10	REFIN/OUT	Pino de entrada e saída de referência de tensão
11	A _{GND}	Pino de terra analógico
12	SCK / F2	Clock serial ou frequência de controle para o pino HF _{OUT}
13	SDI / F1	Entrada de dado serial ou controle de frequência para F _{OUT0/1}
14	CS / F0	Seleção de chip ou controle de frequência para F _{OUT0/1}
15	G1	Pino de controle de ganho do canal de corrente
16	G0	Pino de controle de ganho do canal de corrente
17	OSC1	Pino de entrada dos geradores de clock
18	OSC2	Pino de saída dos geradores de clock
19	NC	Não conectado
20	SDO / NEG	Pino de saída serial ou saída lógica de potência reversa
21	D _{GND}	Pino de terra digital
22	HF _{OUT}	Pino de saída de pulso de alta frequência
23	F _{OUT1}	Pino de saída para contadores diferenciais mecânicos
24	F _{OUT0}	Pino de saída para contadores diferenciais mecânicos

Fonte: Adaptado de MICROCHIP (2012)

A aquisição dos sinais de corrente e tensão poderia ser feita diretamente através dos canais analógicos do Arduino, entretanto, optou-se por utilizar o MCP3909 visto que o mesmo possui diversos filtros e CADs (conversores analógicos digitais) internos permitindo a coleta

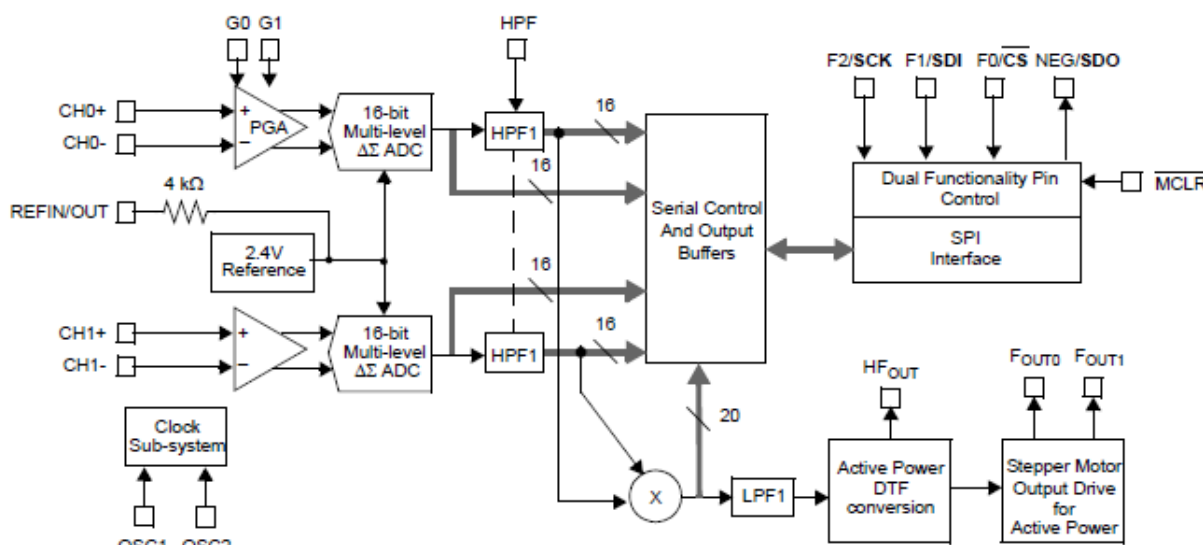
da saída proporcional de pulso, bem como das formas de onda de corrente e tensão via SPI, possibilitando medição de energias ativa, reativa e aparente com alta precisão, reduzindo esforços no tratamento dos sinais de entrada e permitindo um melhor aproveitamento das tecnologias embarcadas no CI.

3.2.1 Princípio de Funcionamento do MCP3909

O CI pode operar de duas maneiras distintas, já que conta com pinos que possuem função dupla.

A primeira delas é a saída de pulso proporcional à potência ativa. Nesse padrão de utilização o CI fornece uma saída proporcional à potência ativa real medida como mostra a Figura 3.3.

Figura 3.3 – Princípio de Funcionamento do MCP3909



Fonte: MICROCHIP (2012)

Os filtros passa-alta cancelam qualquer offset DC que possa existir em ambos os canais, garantindo que o cálculo da potência ativa real não inclua nenhum offset, seja do próprio circuito ou do sistema (MICROCHIP, 2012). Uma vez filtrados, os sinais dos canais 0 e 1 são multiplicados de modo a obter a potência ativa instantânea e, já que o sinal previamente filtrado não contém mais componentes DC, a técnica do valor médio pode ser aplicada, juntamente ao filtro passa-baixa, garantindo na saída uma frequência proporcional à potência ativa instantânea real.

A segunda funcionalidade disponível é utilizando a interface serial fornecida pelo CI. Três modos de operação serial são fornecidos pelo mesmo, sendo eles: modo multiplicador,

modo de saída em dois canais e saída de filtro. O modo serial é utilizado através dos pinos duplos da função SPI e acionado por meio do envio de um comando serial, específico de cada modo, durante um período pré-definido. Nesse modo de operação o MCP3909 permite a amostragem dos canais de corrente e tensão de maneira que os sinais são captados antes ou depois do filtro passa-alta e enviados via serial para um microcontrolador para serem interpretados.

A frequência de amostragem do ADC de ambos os canais é dada pela equação (3.1).

$$F_s = \frac{MCLK}{4} \quad (3.1)$$

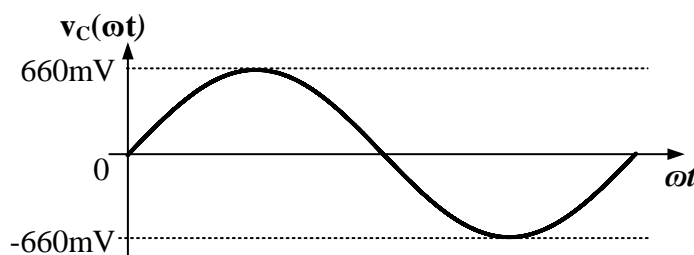
No caso do medidor projetado, que conta com um clock aproximado de 3,58 MHz, a frequência de amostragem é de aproximadamente 900 kHz.

As entradas dos canais de tensão e corrente são explanados em detalhes nos tópicos 3.3 e 3.4 respectivamente.

3.3 Circuito de Medição de Tensão

O canal de medição de tensão do MCP3909 conta com um amplificador diferencial de ganho não programável na entrada. O amplificador possui sinal diferencial máximo de ± 660 mV, conforme é mostrado na Figura 3.4.

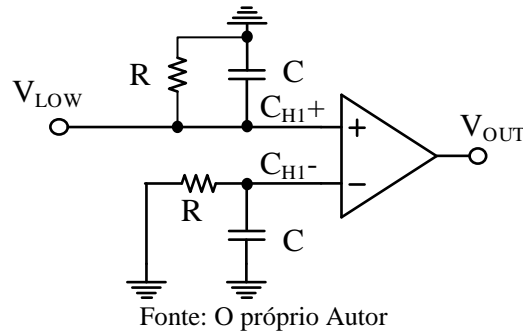
Figura 3.4 – Sinal Diferencial Máximo do Canal de Tensão



Fonte: Adaptado de (ANALOG-DEVICES, 2000)

O circuito de entrada do canal de tensão, já com os respectivos filtros, é exemplificada, de maneira simplificada, na Figura 3.5.

Figura 3.5 – Amplificador Diferencial de Ganho Não Programável



Na entrada do canal utilizou-se um filtro RC passa baixa de primeira ordem segundo instruções do fabricante. A determinação dos resistores e capacitores do filtro é descrita pelas equações (3.2) e (3.3). Vale lembrar que a frequência de amostragem do circuito (F_s) é de cerca de 900 kHz. Optou-se pela utilização de uma frequência de corte de metade da frequência de amostragem, tomando como base notas de aplicação do fabricante do CI.

$$F_C \leq \frac{F_s}{2} \quad (3.2)$$

$$F_C \leq 450 \text{ kHz} \quad (3.3)$$

Sendo a frequência de corte (F_C) igual a 450 kHz, determina-se os resistores e capacitores do filtro por meio da equação (3.4).

$$F_C = \frac{1}{2\pi RC} \quad (3.4)$$

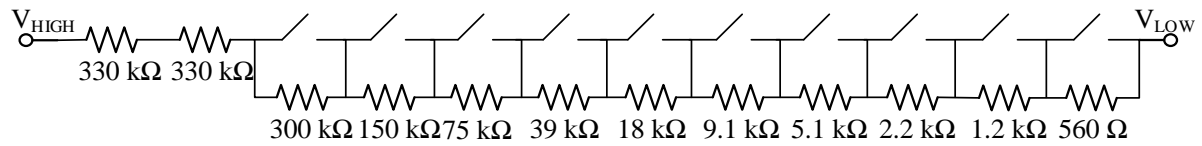
Fixando o valor da capacitância em 270 pF, já que resistores apresentam uma maior gama de valores comerciais, obtém-se o valor da resistência pela equação (3.5).

$$R = \frac{1}{2\pi \cdot 450 \cdot 10^3 \cdot 270 \cdot 10^{-12}} = 1,31 \text{ k}\Omega \quad (3.5)$$

Ajustando o resistor obtido para valores comerciais disponíveis no laboratório de desenvolvimento, utilizou-se uma resistência com o valor de 1,2 k Ω .

Para o projeto optou-se pela utilização de uma malha resistiva como transdutor de tensão, a malha construída funciona como um divisor de tensão e conta com 10 resistores em série, garantindo resolução de calibração de 10 bits. Além de permitir alta precisão na calibração do sinal de entrada, a malha de tensão se mostra a melhor escolha para o sistema a ser desenvolvido devido ao seu tamanho reduzido e baixo custo. Uma representação da malha de tensão utilizada pode ser vista na figura abaixo.

Figura 3.6 – Malha de Calibração



Fonte: O próprio Autor

Caso todos os *jumpers* da malha estejam fechados, ou seja, menor resistência na malha, a frequência de corte do filtro passa-baixa do canal não vai ser alterada, visto que a resistência da mesma vai ser sempre muito maior que a do filtro, garantindo assim, estabilidade do mesmo.

Para a malha em questão, no caso em que todos os *jumpers* estejam abertos, a resistência equivalente será de 1,26 MΩ, e caso todos estejam fechados, a resistência equivalente será de 660 kΩ. Dados esses valores, é possível determinar a resolução em ohms da malha, além de verificar as tensões mínimas e máximas as quais o canal será submetido, determinados, respectivamente, pelas equações 3.6 e 3.7.

$$V_{CH1} = 220 \cdot \frac{1,2 \cdot 10^3}{1,26 \cdot 10^6 + 1,2 \cdot 10^3} \cong 209 \text{ mV} \quad (3.6)$$

$$V_{CH1} = 220 \cdot \frac{1,2 \cdot 10^3}{660 \cdot 10^3 + 1,2 \cdot 10^3} \cong 333 \text{ mV} \quad (3.7)$$

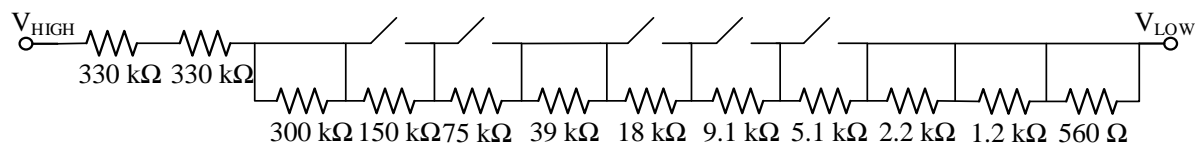
Define-se então a precisão da malha como mostra a equação (3.8).

$$\text{Resolução} = \frac{333 \cdot 10^{-3} - 209 \cdot 10^{-3}}{1024} = 121 \mu\Omega \quad (3.8)$$

3.3.1 Calibração Utilizada

De modo a calibrar o medidor, fechou-se os *jumpers* da malha de resistores conforme mostra a Figura 3.7.

Figura 3.7 – Malha de Calibração Final



Fonte: O próprio Autor

A malha após calibrada apresenta resistência de 917,2 kΩ. Com o fechamento escolhido o canal receberá nos seus terminais de entrada o valor de aproximadamente 290 mV

seguindo cálculos similares as equações (3.6) e (3.7), tendo uma relação de transformação de aproximadamente 800:1.

3.4 Circuito de Medição de Corrente

O canal de medição de corrente do MCP3909 conta com um amplificador diferencial de tensão similar ao do canal de tensão, entretanto com ganho programável conforme mostra a Tabela 3.2.

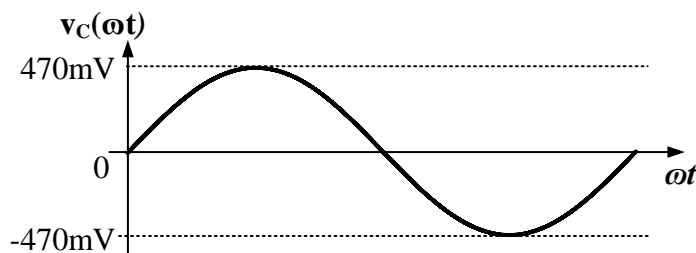
Tabela 3.2 – Seleção de Ganhos do Canal

G1	G0	G	Tensão Máxima
0	0	1	± 470 mV
0	1	2	± 235 mV
1	0	8	± 60 mV
1	1	16	± 30 mV

Fonte: Adaptado de MICROCHIP (2012)

Quando o ganho do canal é mínimo, obtém-se a tensão diferencial máxima de entrada. Nesse caso, o sinal na entrada do canal será como ilustra a Figura 3.8.

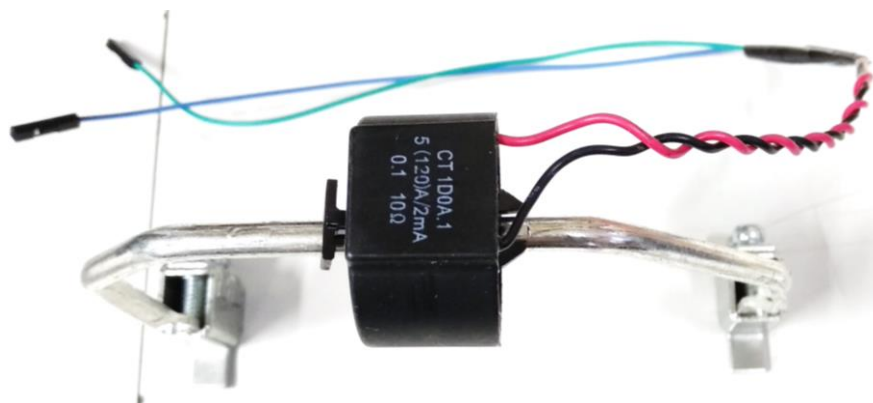
Figura 3.8 – Sinal Diferencial Máximo do Canal de Corrente



Fonte: Adaptado de ANALOG-DEVICES (2000)

Para o projeto optou-se por utilizar para esta medição um TC. O mesmo possui relação nominal de 2500:1 e foi escolhido pois permite a medição de corrente em níveis elevados sem interferir na robustez necessária para o circuito de corrente, contando também com excelentes níveis de precisão. A Figura 3.9 mostra o TC utilizado no projeto.

Figura 3.9 – Transformador de Corrente Utilizado



Fonte: O próprio autor

Como mencionado previamente, associado a um TC deve-se utilizar um resistor shunt de modo a converter a saída de corrente em um sinal de tensão a ser usado pelo CI de medição, além disso, o resistor no secundário do TC impede que o mesmo fique em aberto seja qual for a condição de carga. Neste caso o resistor escolhido foi de 15 Ω , seguindo padrões recomendados pelo fabricante do CI.

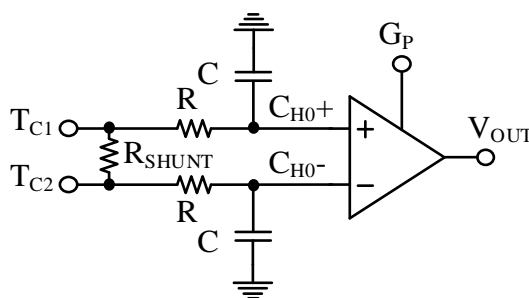
Para determinação do ganho no canal levou-se em consideração a máxima tensão a qual este será submetido. Com base na corrente máxima a ser medida, definiu-se a amplitude do canal garantindo alta resolução nas variações de corrente. Neste projeto a corrente máxima a ser medida é de 40 A, e, nessa condição, a corrente de saída do TC será de aproximadamente 15 mA, resultando em uma tensão máxima no canal determinada pela equação (3.9).

$$V_{CH0} = 15 \cdot 15 \cdot 10^{-3} = 225 \text{ mV} \quad (3.9)$$

Desse modo, para garantir uma boa resolução de medição nessa ampla faixa de operação, optou-se por utilizar o ganho do canal 2, garantindo tensão máxima neste de 235 mV. Como os transformadores de corrente possuem saída com baixo ruído, o uso de aproximadamente toda a banda do canal continua sendo uma escolha razoável.

A entrada do canal de corrente, já com os filtros de entrada, é exemplificada, de maneira simplificada, na Figura 3.10.

Figura 3.10 – Amplificador Diferencial de Ganho Programável



Fonte: O próprio Autor

Vale ressaltar que a escolha do filtro para esse canal segue a mesma do de tensão e, portanto, os capacitores e resistores escolhidos são os mesmos.

3.5 Fonte de Alimentação

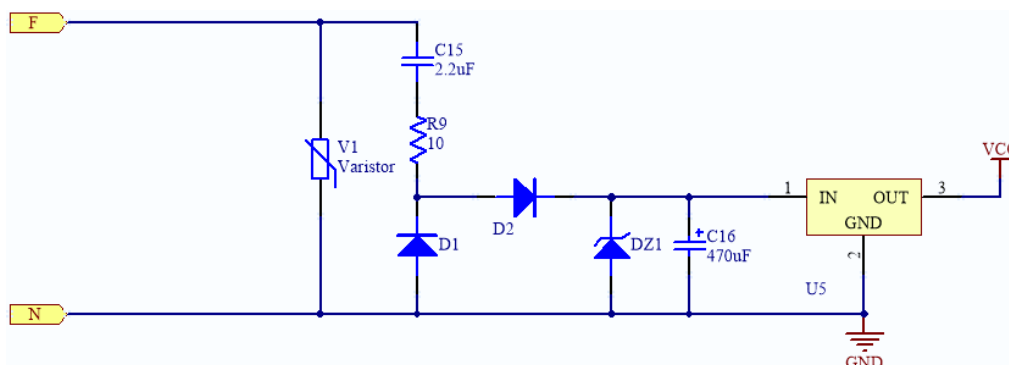
Para alimentar o circuito, optou-se por utilizar uma fonte capacitiva fazendo uso de um retificador de meia onda, um zener e um regulador de tensão, de modo a garantir a tensão de alimentação contínua e constante para os demais elementos.

Fontes capacitivas são fontes de baixo custo e de rendimentos satisfatórios quando em aplicação em circuitos de baixa potência que não exijam isolamentos galvânicos. Para o caso do medidor desenvolvido, a fonte capacitiva permite gerar a tensão de saída para a regulação suficientemente pequena e sem ruídos, além de permitir a utilização do mesmo sinal de entrada para a malha resistiva de medição, com sinais menos suscetíveis a interferências geradas por conta do uso do transformador de alimentação.

Desejava-se obter uma tensão na saída do capacitor suficientemente grande para retificação para então alimentar o zener regulador de 15 V. Esta tensão é então reduzida para 5 V através do regulador de tensão LM7805. O 7805 é um regulador de tensão fixa, com supressão de ruído e fornece 5 V estáveis na saída do seu canal com até 1.5 A, possui também proteções contra sobrecorrente e desligamento térmico, os tornando virtualmente indestrutíveis (TEXAS-INSTRUMENTS, 2016).

O circuito da fonte utilizada é apresentado na Figura 3.11.

Figura 3.11 – Esquemático da Fonte de Alimentação

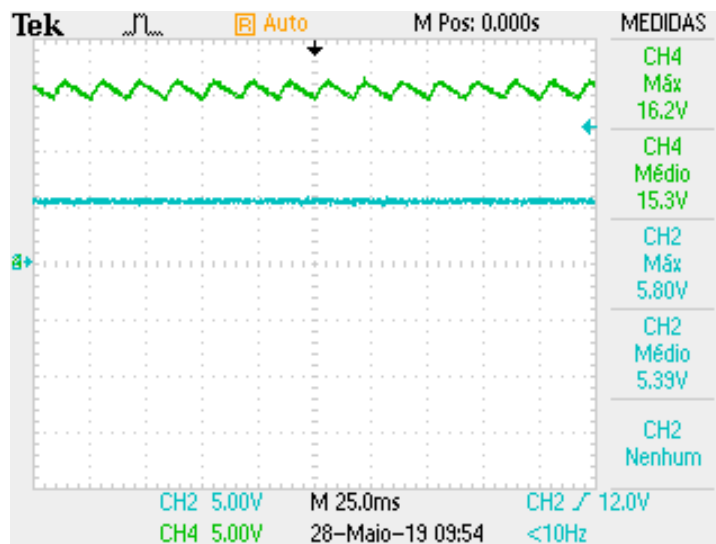


Fonte: O próprio autor

No esquemático apresentado faz-se uso de um varistor de modo a garantir proteção ao circuito em de sobretensões prejudiciais. O varistor diminui sua resistência conforme há aumento de tensão nos seus terminais, neste caso, se houver tensões muito superiores as tensões para a qual a fonte foi projetada, a resistência do componente vai diminuir até que a corrente circule toda por ele em direção a terra, protegendo, assim, o circuito da fonte.

As formas de onda obtidas nos terminais da fonte de alimentação podem ser observadas na Figura 3.12.

Figura 3.12 – Formas de Onda Obtidas na Fonte



Fonte: O próprio autor

3.6 Display LCD

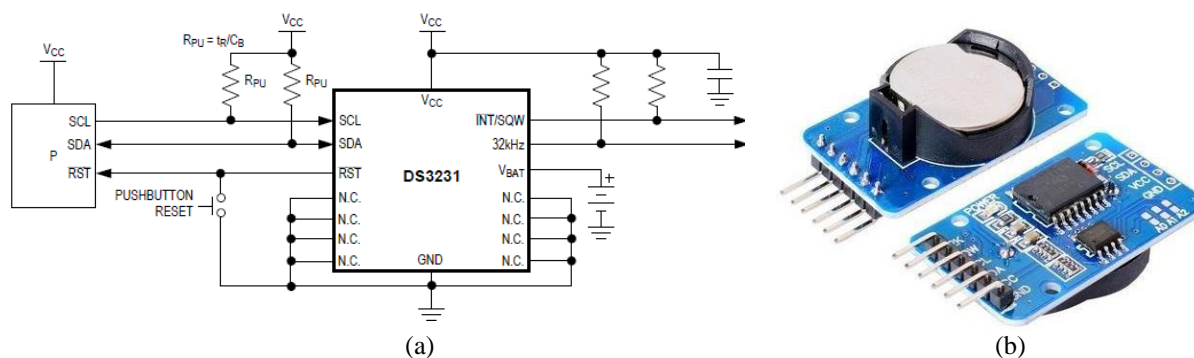
Para o projeto desenvolvido foi necessária a utilização de um display para leitura local das informações a serem fornecidas pelo medidor. Para tal optou-se por utilizar o display LCD ADM1602K, o display conta com 16 colunas por 2 linhas, garantindo 32 caracteres de

espaço a serem utilizados, tamanho esse suficientemente grande para a aplicação utilizada. Possui controle de contraste ajustável via potenciômetro além de possuir luz de fundo, aliado ao baixo custo o display escolhido tornou-se uma opção bastante viável para o sistema de exibição local.

3.7 Real Time Clock DS3231

De modo a obter, de maneira mais precisa, um relógio para o medidor, fez-se uso de um RTC (*Real Time Clock*). Optou-se pelo uso da placa ZS-042, essa placa faz uso do RTC DS3231. O DS3231 é um dispositivo de alta precisão, baixo custo que possui interface I2C permitindo comunicação simplificada com microcontroladores. O dispositivo conta com uma bateria integrada que mantém o mesmo ligado garantindo sincronizações de data e hora altamente precisas. O dispositivo permite ainda a programação de alarmes para até dois horários fixados pelo usuário e uma saída de pulso programável (MAXIM-INTEGRATED, 2015). Na Figura 3.13 (a) é apresentado o diagrama esquemático do DS3231 e na (b) contém a placa utilizada que inclui todo o sistema do CI bem como a bateria para o mesmo.

Figura 3.13 – Diagrama Operacional DS3231

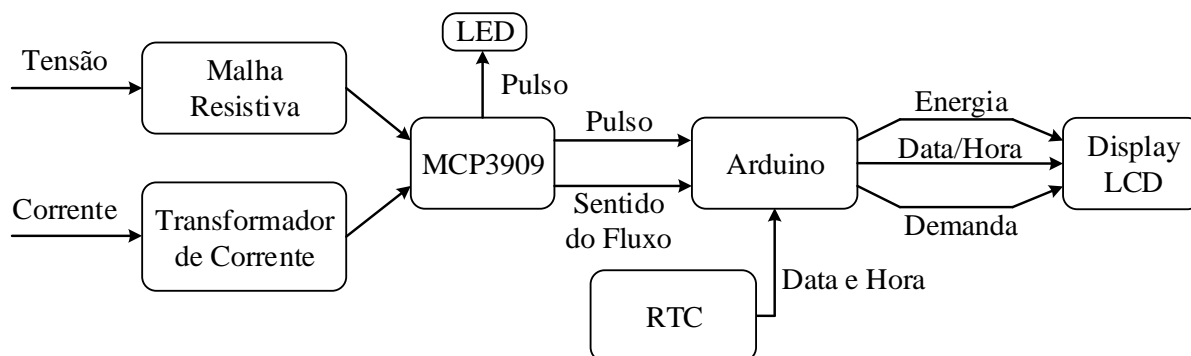


Fonte: MAXIM-INTEGRATED (2015)

3.8 Medidor Desenvolvido

Avaliadas todas as características necessárias para um bom rendimento no sistema de medição desenvolveu-se os esquemáticos dos circuitos de aquisição, tratamento e exibição. Na Figura 3.14 é apresentado o esquemático do sistema de aquisição.

Figura 3.16 – Diagrama Funcional do Medidor



Fonte: O próprio autor

3.9 Firmware

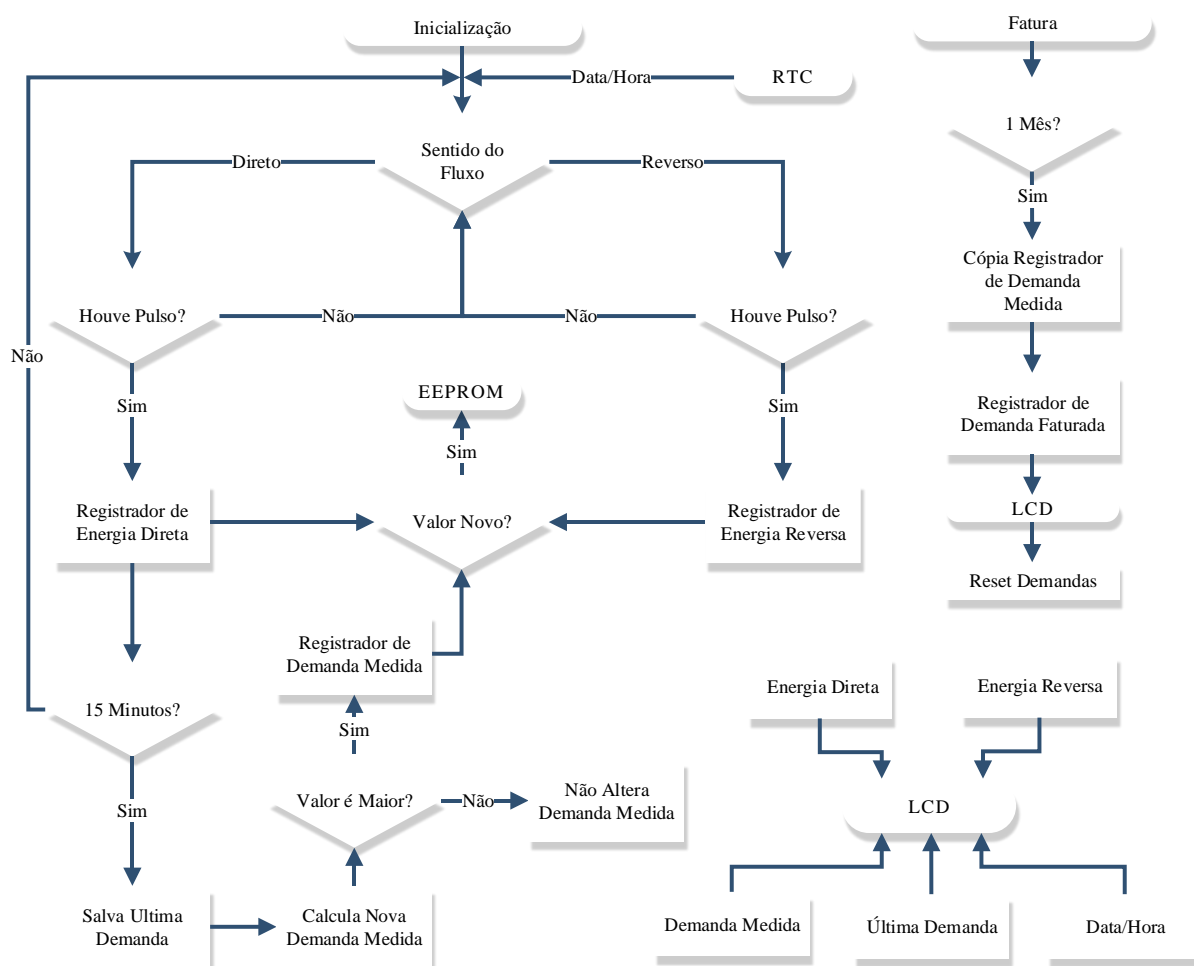
Firmware é um tipo de software que é armazenado em memória não volátil e permite controle direto sobre hardware (DOURADO, 2018). O firmware desenvolvido para utilização do medidor foi feito diretamente na IDE do Arduino. O medidor é capaz de exibir em seu *display* data e hora, energia ativa direta e reversa, demanda medida, ultimo intervalo de demanda e demanda faturada. Alguns dos dados obtidos devem ser salvos de maneira permanente, de modo que, uma vez que o sistema seja desligado, ou que haja uma falta de energia os valores armazenados não sejam perdidos sendo assim devem ser salvos em memória não volátil. Para tal utiliza-se a EEPROM do Arduino com intuito de realizar o armazenamento dos dados de energia e demanda a serem restaurados nos casos em que haja desligamento do medidor.

Após a declaração das variáveis e definições necessárias para o correto funcionamento do *firmware* a execução começa. Os pulsos de saída do CI de medição são lidos pelo microcontrolador e utilizando-se de uma constante de proporcionalidade de pulso armazena-se o valor de energia no registrador definido pelo pino de sentido de fluxo. A cada quinze minutos é feita uma atualização da demanda medida e do último intervalo de demanda. A demanda é calculada com base na quantidade de energia requerida em cada intervalo de quinze minutos, o valor de demanda medida somente é armazenado em memória caso seja maior que o anterior, conforme descrito em 2.6. O último intervalo de demanda recebe a cada quinze minutos o valor que estava atualmente no registrador de demanda medida, ou seja, mostra sempre a demanda consumida no último intervalo considerado. Com o passar de um mês, o registrador de demanda faturada receberá o valor máximo do mês armazenado no

registrador de demanda medida, exibirá esse valor e então zerar-se-ão todos os registros de demanda do mês, recomeçando o ciclo mensal de consumo.

A Figura 3.17 contém o fluxograma do *firmware* utilizado para melhor entendimento.

Figura 3.17 – Fluxograma de *Firmware*

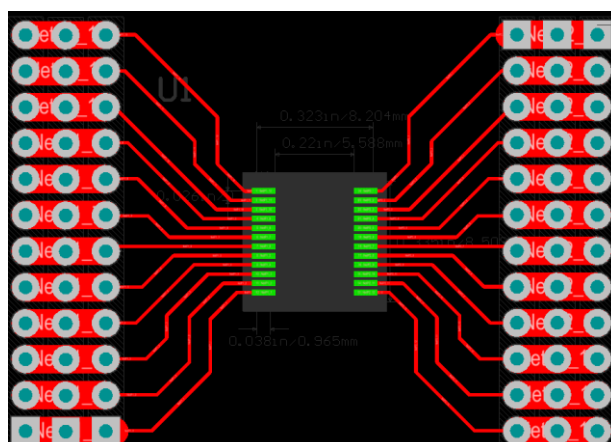


Fonte: O próprio autor

3.10 Confeção da PCB

Para os testes iniciais do MCP3909 foi confeccionada uma placa de circuito impresso que permitisse a adaptação do encapsulamento SSOP do CI para o uso em protoboard durante os testes iniciais. Utilizando o software *Altium Designer*® desenvolveu-se a primeira versão da PCB (*Printed Circuit Board*) que consistia apenas na adaptação direta dos encapsulamentos esta versão é mostrada na Figura 3.18.

Figura 3.18 – Adaptação de Encapsulamento

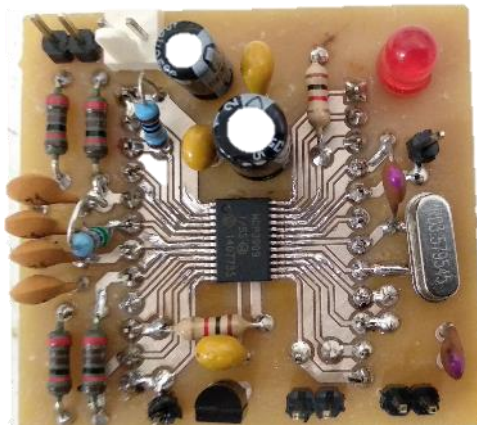


Fonte: O próprio autor

A etapa inicial de testes com apenas o adaptador de encapsulamento foi de grande utilidade para averiguação simplificada dos aspectos previamente calculados, de modo a garantir que o sistema de medição e aquisição de dados estivesse seguro e funcional.

Portanto, uma vez testadas as considerações tomadas e com os ajustes necessários realizados, desenvolveu-se outra versão de PCB que incluía todas as entradas necessárias para medição, todo o sistema de filtragem e aquisição de sinais e a saída de pulso proporcional a potência ativa como mostra a Figura 3.19.

Figura 3.19 – PCB Completa de Medição



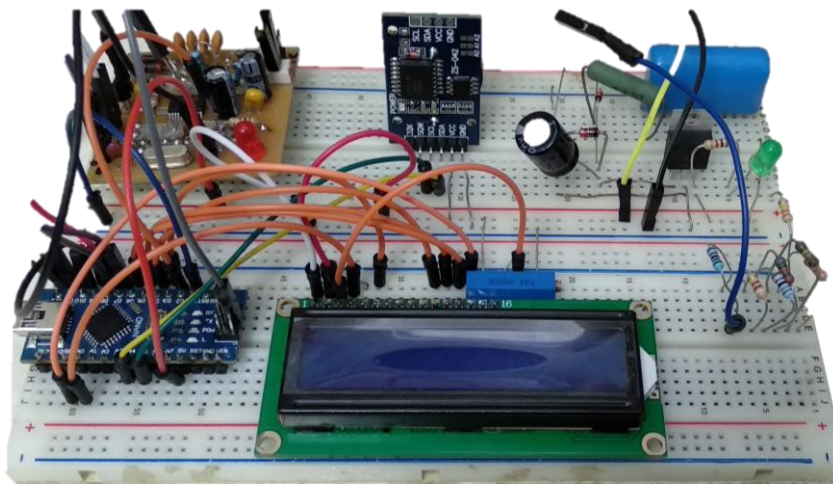
Fonte: O próprio autor

Uma vez desenvolvida a placa de medição, melhoras foram obtidas com relação a qualidade do sinal amostrado e precisão da saída de pulso.

4 IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA

Com objetivo de analisar a performance do protótipo desenvolvido, avaliou-se o comportamento do mesmo em cargas com diversas características e verificou-se o erro percentual baseado na saída de pulso do mesmo. Na Figura 4.1 é possível ver o sistema completo, montado em uma protoboard.

Figura 4.1– Montagem do Sistema Completo



Fonte: O próprio autor

Para realização dos testes, foi utilizada uma bancada de testes, especialmente desenvolvida para testes em medidores de energia elétrica, do fabricante HEXING. A bancada possui padrão de exatidão de 0,01% homologado pelo INMETRO. Na Figura 4.2 é possível ver a bancada utilizada.

Figura 4.2– Bancada Utilizada



Fonte: O próprio autor

Para realização dos ensaios são enviados à bancada os valores de corrente e tensão desejados. Esta, portanto, controla a quantidade de energia que é enviada ao medidor. A comparação entre o valor de energia enviado e o lido pelo medidor é feita através da leitura dos pulsos de saída do mesmo, utilizando-se o LED do dispositivo e o leitor de pulsos da bancada. Uma vez lidos os pulsos, a bancada compara com o seu padrão e determina o erro percentual da medida feita pelo dispositivo.

O medidor é conectado a bancada utilizando artifícios na montagem, visto que, características do circuito da bancada, que é desenvolvida para medidores invasivos. Os terminais de medição de tensão foram conectados a saída de tensão externa fornecida pela bancada, essa saída, fornece a exata tensão de simulação fornecida pelo gerador da bancada. Para o circuito de corrente, fechou-se o circuito de corrente com um cabo, este cabo é passado no interior do TC de medição para aquisição da corrente.

Os resultados obtidos foram gerados através do fornecimento de condições variadas de potência por meio da bancada, para tensão aplica-se sempre tensão nominal, na Tabela 4.1 é possível ver as condições de corrente e fator de potência aplicadas no medidor durante a realização dos ensaios.

O medidor obteve resultados satisfatórios de medição como mostra a Tabela 4.1. Vale lembrar que a corrente nominal do medidor é 40 A e que em todos os casos foi aplicado tensão nominal.

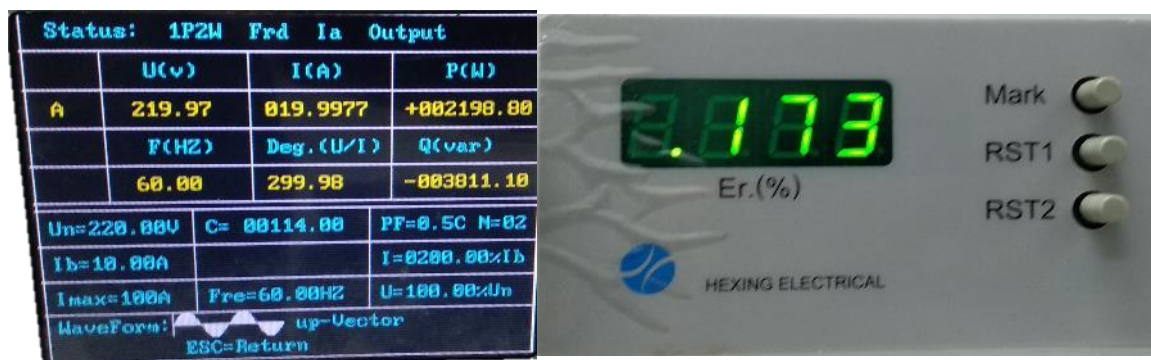
Tabela 4.1– Erros Percentuais do Medidor

In (%)	$\cos(\theta)$	ϵ_r (%)
1,25	1	6,21
12,5	1	-0,323
25	1	0,313
50	1	0,173
100	1	0,173
50	0,5I	-6,41
50	0,5C	-18,2
50	0,8I	4,55
50	0,8C	5,98

Fonte: O próprio autor

Para melhor entendimento da obtenção dos resultados nos testes em bancada é possível ver na Figura 4.3 os valores do display do padrão da bancada (a) e do erro (b) sendo exibidos.

Figura 4.3– Exemplo de Coleta de Resultados



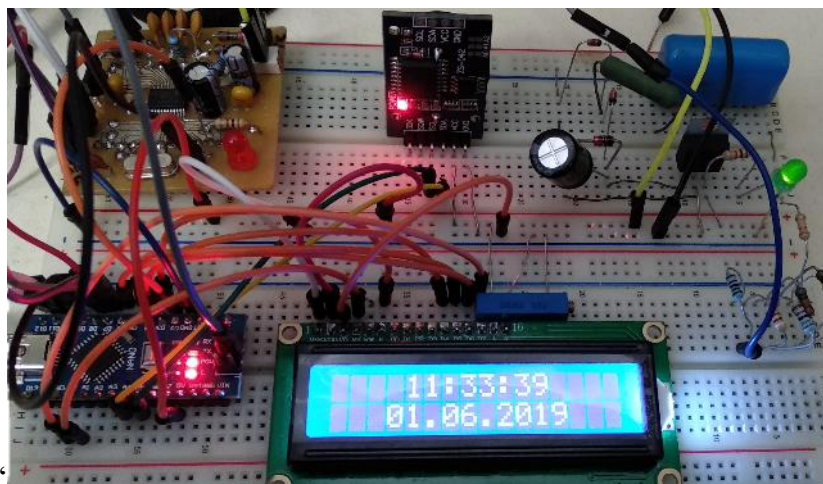
Fonte: O próprio autor

Com os resultados obtidos é possível concluir que o medidor, nas circunstâncias de fator de potência unitário, apresenta o comportamento de um medidor Classe B, como mostra a Tabela 2.4. O valor de erro nas condições de 1% da carga nominal também está aceitável, visto que esta corrente é praticamente a de sensibilização do sistema. No entanto, conforme há a inserção de cargas reativas, o comportamento do medidor já não é tão satisfatório, visto que atinge-se níveis acima do recomendado para obtenção da classe A, como mostra a Tabela 2.5. Possivelmente essa resposta inesperada ocorra devido a não utilização dos indutores na entrada dos canais de medição de corrente, a utilização destes é uma prática recomendada quando se utiliza transformadores de corrente para obtenção dos sinais, outro agravante seriam problemas devido uso da protoboard, além disso, é importante reavaliar se a filtragem do sinal de entrada está causando efeito de *aliasing*, prejudicando o sinal de entrada do CI. Entretanto uma análise mais detalhada é necessária de modo a determinar o que causa esse aumento no erro nas condições em que há carga reativa.

As funções de operação pós falta de energia, memória não volátil, cálculo de energia, verificação de sentido de fluxo, precisão horária e demandas foram também verificadas. Os resultados foram satisfatórios e o medidor se mostrou funcional no que propunha.

Na Figura 4.4 é possível analisar o funcionamento correto do RTC, sendo mostrada a hora e data como esperado.

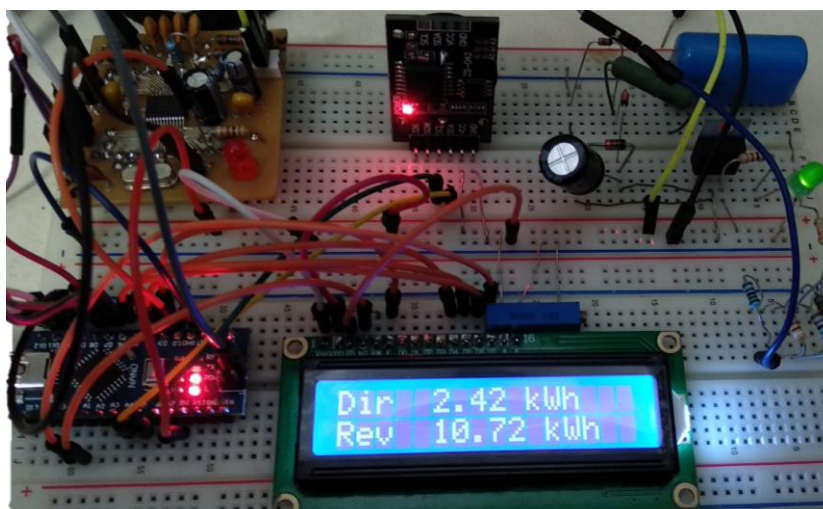
Figura 4.4– Display de Data e Hora



Fonte: O próprio autor

Na Figura 4.5 é possível ver os registradores de energia, “Dir” é o registrador de energia direta, no atual momento foi fornecido ao medidor 2,42 kWh de energia direta, obtidos por meio da bancada de teste, fornecendo tensão nominal, fator de potência unitário e corrente em 25 A por aproximadamente vinte seis minutos. Para avaliar o registro de energia reversa, cujo registrador é “Rev” utilizou-se tensão nominal e corrente nominal em fase durante 1 hora e 13 minutos aproximadamente. Esse teste além de determinar o registro do medidor de maneira correta, dependendo do fluxo utilizado, avalia a capacidade do mesmo de se manter com erro constante durante longos intervalos de utilização. O resultado de ambos os testes foi satisfatório, o medidor se provou capaz de registrar corretamente a energia, independentemente do tempo de funcionamento.

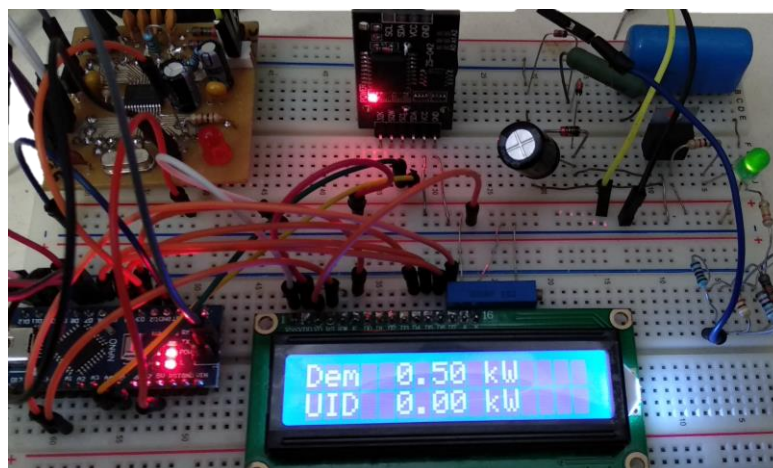
Figura 4.5– Display de Energias



Fonte: O próprio autor

Na Figura 4.6 é possível ver o funcionamento do registro de demanda de um intervalo, o registrador “Dem” mostra a demanda de um intervalo de quinze minutos averiguado. O registrador “UID” contém o registro do último intervalo de demanda do medidor, como apenas um intervalo foi computado durante os testes, o registro anterior de demanda era vazio, sendo assim, o último intervalo de demanda também.

Figura 4.6– Display de Demandas



Fonte: O próprio autor

5 CONCLUSÃO

O sistema desenvolvido mostrou-se capaz de atender as aplicações para as quais foi proposto, atendendo a diversos requisitos exigidos em norma e permitindo ao usuário acesso rápido a informações que podem vir a facilitar o seu controle de consumo.

O MCP3909 provou-se um dispositivo excelente para aplicação em sistemas de medição de energia, principalmente devido a sua precisão e robustez, fazendo do mesmo uma excelente escolha para este tipo de aplicação. No entanto a capacidade do CI não pode ser totalmente avaliada, visto que ele possui interface SPI onde é possível obter-se os dados de energia reativa além de valores instantâneos do sistema a ser medido. A implantação da comunicação SPI não foi possível devido a limitações do microcontrolador escolhido, não permitindo a sincronização da comunicação no tempo necessário para que o CI entrasse em operação no modo correto.

O Arduino apresentou-se uma ferramenta interessante para verificação da precisão da medição do CI, entretanto, a utilização da IDE do mesmo no desenvolvimento do firmware não foi a melhor escolha para atingir a capacidade total do MCP3909, já que, como mencionado previamente, não foi possível estabelecer a comunicação SPI. Uma alternativa para esse problema poderia ser continuar utilizando a plataforma Arduino como controlador, entretanto, programar o microcontrolador de maneira direta, utilizando outra IDE e compilador. Apesar desse problema, o microcontrolador se mostrou bastante versátil e simples, permitindo a implementação de todo o resto do sistema de maneira satisfatória.

De modo global, a execução do projeto foi bem-sucedida e serve como modelo viável para melhorias, sendo o presente projeto uma etapa inicial de um protótipo mais completo, servindo como aprendizado mais aprofundado das tecnologias utilizadas e norteando com relação ao que deve ser feito para futuros aprimoramentos no dispositivo.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

Apesar do funcionamento satisfatório, em certas condições o sistema elaborado apresenta grande capacidade de aprimoramento, dentre as diversas melhorias que podem ser aplicadas, destacam-se as seguintes:

- Solucionar o aumento do erro percentual nas condições de entrada de carga reativa.
- Substituição da estratégia utilizada no microcontrolador, de modo a estabelecer com sucesso a comunicação SPI.
- Leituras de energia reativa e grandezas instantâneas.
- Implementação de um sistema de transmissão de dados via WI-FI, permitindo ao usuário acesso remoto as informações do medidor.
- Desenvolvimento de um sistema alimentado também a bateria, prevenindo o desligamento total do medidor em condições de falta.
- Criação de um banco de dados com os valores das medições realizadas.
- Desenvolver o sistema completo em PCB única.

REFERÊNCIAS

AMOTEC, X. **Specifications of LCD Models** 2008.

ANALOG-DEVICES. **Energy Metering IC with Pulse Output** Datasheet AD7755 2000.

ANEEL, A. N. D. E. E.-. **RESOLUÇÃO NORMATIVA Nº 414** 2010.

AQUINO, A. T. D. **Desenvolvimento de um Sistema Embarcado Aplicado na Gestão de Energia Elétrica**. 2018. Centro de Ciências Tecnológicas, Universidade de Fortaleza, Fortaleza/CE.

ARDUINO. Arduino Nano. 2019. Disponível em: < <https://store.arduino.cc/usa/arduino-nano> >. Acesso em: 11/05/2019.

BRITO, J. L. G. D. **Sistema para monitoramento de consumo de energia elétrica particular, em tempo real e não invasivo utilizando a tecnologia Arduino**. 2016. (Graduação). Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Estadual de Londrina, Londrina.

DAHLE, D. Watthour Meters: Dedicated to the history of the watthour meter in North America. 2010. Disponível em: < <http://watthourmeters.com> >. Acesso em: 27/04/2019.

DOURADO, Y. D. S. **Desenvolvimento de um Medidor de Energia Ativa Bidirecional para Aplicação em Microgeração Residencial**. 2018. Departamento da Indústria Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, Fortaleza/CE.

ELETRA. Catálogo de Medidores. 2019. Disponível em: < <http://www.eletraenergy.com/br/portifolio/15-medidores> >. Acesso em: 27/04/2019.

EPE. **Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2018** Ano Base 2017. Brasil: Ministério de Minas e Energia 2018.

FERREIRA, J. B. **Análise de Formas de Medição de Consumo de Energia Elétrica no Setor Residencial**. 2012. Centro de Informática, Universidade Federal de Pernambuco, Recife/PE.

FURLAN, E. G. B. **Solução Automatizada de Testes de Validação em Medidores Eletrônicos de Energia Elétrica**. 2018. Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza/CE.

GRAHAM, R. et al. **Handbook for Electricity Metering**. 11th Ed. Washington-D.C: Edison Electric Institute, 2014.

HAPENCIUC, I.-A. **Low-Cost Shunt Power Meter using MCP3909 and PIC18F25K20**. MICROCHIP 2009.

INMETRO. **REGULAMENTO TÉCNICO METROLÓGICO A QUE SE REFERE A PORTARIA INMETRO N.º 587** 2012.

KING, C. L. **IEC Compliant Active-Energy Meter Design Using The MCP3905A/06A**. MICROCHIP 2009.

MAXIM-INTEGRATED. **Extremely Accurate I2C-Integrated RTC/TCXO/Crystal**. DS3231 2015.

MICROCHIP. **Energy Metering IC with SPI Interface and Active Power Pulse Output** Datasheet MCP3909 2012.

NICOLAU, C. T. **Medição de Energia Elétrica: impactos da mudança tecnológica no setor jurídico de uma concessionária distribuidora de energia elétrica**. 2013. Departamento de Metrologia, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

NILSSON, J. W.; RIEDEL, S. A. **Circuitos Elétricos**. 8th. Pearson Education, 2009.

TEXAS-INSTRUMENTS. **LM340, LM340A and LM7805 Family Wide Vin 1.5A Fixed Voltage Regulators** 2016.

VAZ, L. C. T. **Supervisão e Controlo Remoto da Iluminação na Via Pública**. 2010. Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal.

APÊNDICE A – CÓDIGO FONTE EM INO PARA O FIRMWARE

```

/*-----Medidor de Energia FTX V01-----
   Medidor de Energia Elétrica Bidirecional desenvolvido durante execução do
   trabalho
   de conclusão de curso de Engenharia Elétrica pela UFC por Tito Livio.
*/

//-----Bibliotecas-----
#include <LiquidCrystal.h>
#include <EEPROM.h>
#include <DS3231.h>

//-----Variables-----
LiquidCrystal LCD(A1, 3, 4, 5, 6, A0); //Startup for LCD
DS3231 rtc(SDA, SCL); //Startup for RTC

#define Pow 2 // Input for power pulse
#define NEG 10 // Negate Sign for Reverse
#define f0 11 // Frequency selector 0
#define f1 12 // Frequency selector 1
#define f2 13 // HPF Selector
#define mclr 9 // IC Master Clear

#define G0 7 //Pinout for the Gains
#define G1 8

#define v A2 //Pinout for analogreads
#define i A3

float Edir;
float Erev;

float PowDir;
float PowRev;

boolean pulsodir;
boolean pulsorev;

int adrdir = 0;
int adrrev = 4;
int adrdem = 8;
int adruuid = 12;

float D;
float tempD;
float Dem;
float Dfat;
float UID;

float V = 0;
float I = 0;
float P = 0;

int val = 0;

Time t;
Time w;

```

```

unsigned int cont = 0;

//-----Startup-----
void setup() {
//RTC Startup
rtc.begin();
//The following lines can be uncommented to set the date and time
//rtc.setDOW(SATURDAY);    // Set Day-of-Week to SUNDAY
//rtc.setTime(13, 38, 00);  // Set the time to 12:00:00 (24hr format)
//rtc.setDate(01, 06, 2019); // Set the date to January 1st, 2014*/

// Master Clear Operational
digitalWrite (mclr, HIGH);

//Gain for 235 mV
digitalWrite (G0, HIGH);
digitalWrite (G1, LOW);

//Frequency Output Selection
digitalWrite (f2, HIGH);
digitalWrite (f1, LOW);
digitalWrite (f0, LOW);

//Idle State for Pulse
pulsodir = HIGH;
pulsorev = HIGH;

//Defining Reading Pinout
pinMode (Pow, INPUT);
pinMode (NEG, INPUT);

//Main Screen
LCD.begin(16, 2);
LCD.setCursor(3,0);
LCD.print("FTX Meter");
delay (2000);

//EEPROM Energy Backup
EEPROM.get (adrdir, PowDir);
EEPROM.get (adrrev, PowRev);

EEPROM.get (adrdem, Dem);
D = PowDir/114;

//Wake up hour
w = rtc.getTime();

}
void loop()
{
  VerifyTime();
  PrintHour();
  ReadPulse();
  PrintEnergy();
  PrintDemand();
}

void PrintDemand()
{
  ReadPulse();
}

```

```

LCD.clear();
for (int aux = 0; aux <=5;aux++)
{
    ReadPulse();
    LCD.setCursor(0,0);
    LCD.print("Dem");
    LCD.setCursor(0,1);
    LCD.print("UID");
    LCD.setCursor(5,0);
    LCD.print(Dem);
    LCD.print(" kW ");
    LCD.setCursor(5,1);
    LCD.print(UID);
    LCD.print(" kW ");
    delay (1000);
}
}
void PrintEnergy()
{
    ReadPulse();
    LCD.clear();
    for (int aux = 0; aux <=500;aux++)
    {
        ReadPulse();
        LCD.setCursor(0,0);
        LCD.print("Dir");
        LCD.setCursor(0,1);
        LCD.print("Rev");
        LCD.setCursor(5,0);
        LCD.print(Edir);
        LCD.print(" kWh");
        LCD.setCursor(5,1);
        LCD.print(Erev);
        LCD.print(" kWh");
        delay (10);
    }
}
void PrintInstant()
{
    LCD.clear();
    for (int aux = 0; aux <=5;aux++)
    {
        LCD.setCursor(0,0);
        LCD.print(V,1);
        LCD.setCursor(5,0);
        LCD.print ("V");
        LCD.setCursor(0,1);
        LCD.print(I,3);
        LCD.setCursor(5,1);
        LCD.print("A");
        LCD.setCursor(10,0);
        LCD.print(P,1);
        LCD.setCursor(16,1);
        LCD.print("W");
        delay (1000);
    }
}
void PrintHour()
{
    ReadPulse();

```

```

LCD.clear();
for (int aux = 0; aux <=5;aux++)
{
    ReadPulse();
    t=rtc.getTime();
    LCD.setCursor(4,0);
    // Send time
    LCD.print(rtc.getTimeStr());
    // Send date
    LCD.setCursor (3,1);
    LCD.print(rtc.getDateStr());
    delay (1000);
}
}

void ReadPulse()
{
    switch (digitalRead(NEG))//Verify the Direction
    {
        case HIGH: //Direct
            if(digitalRead(Pow)==HIGH) //There's a pulse on the channel
            {
                if(pulsodir==HIGH)
                {
                    PowDir = PowDir + 1;
                    EEPROM.put(addrdir, PowDir);
                }
                pulsodir=LOW;
            }
            else
            {
                pulsodir=HIGH;
            }
            break;
        case LOW: //Reverse
            if(digitalRead(Pow)==HIGH) //There's a pulse on the channel
            {
                if(pulsorev==HIGH)
                {
                    PowRev = PowRev + 1;
                    EEPROM.put(addrrev, PowRev);
                }
                pulsorev=LOW;
            }
            else
            {
                pulsorev=HIGH;
            }
            break;
    }
    Edir = PowDir/114;
    Erev = PowRev/114;
}

void ReadInstant()
{
    val = analogRead (v);
    val = map(val, 0, 1023, 0, 255);
    V = val;
    I = analogRead (i);
    P = V*I;
}

```



```

}

void VerifyTime()
{
    ReadPulse();
    t=rtc.getTime();
    if ((t.min)%15 == 0)
    {
        UID = Dem;
        EEPROM.put(adruuid, UID);
        tempD = Edir;
        D = (tempD - D)*15/60;
        if (D > Dem)
        {
            Dem = D;
            EEPROM.put(adrdem, Dem);
        }
    }
    if (t.hour == (w.hour + 24))
    {
        Dfat = Dem;
        UID = 0;
        EEPROM.put(adruuid, UID);
        Dem = 0;
        EEPROM.put(adrdem, Dem);
        LCD.clear();
        for (int aux = 0; aux <=5;aux++)
        {
            ReadPulse();
            LCD.setCursor(0,0);
            LCD.print("Dfat");
            LCD.setCursor(5,0);
            LCD.print(Dfat);
            LCD.print(" kW ");
            delay (1000);
        }
    }
}

```