



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE TECNOLOGIA
MESTRADO EM TECNOLOGIA



José Maria Cesário Júnior

Grupo de Óptica e Modelagem Numérica - GOMNI

UM MEDIDOR DE ENERGIA ELÉTRICA
INTEGRADO EM REDES DE COMUNICAÇÕES

Limeira

2014



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE TECNOLOGIA
MESTRADO EM TECNOLOGIA



José Maria Cesário Júnior

Grupo de Óptica e Modelagem Numérica - GOMNI

UM MEDIDOR DE ENERGIA ELÉTRICA INTEGRADO EM REDES DE COMUNICAÇÕES

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologia da Faculdade de Tecnologia da Universidade Estadual de Campinas para obtenção do título de Mestre em Tecnologia, área de concentração em Sistemas de Informação e Comunicação

Aluno: José Maria Cesário Júnior

Orientador: Prof. Dr. Varese Salvador Timóteo

Co-Orientador: Prof. Dr. Francisco José Arnold

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO FINAL DA DISSERTAÇÃO
DEFENDIDA PELO ALUNO JOSÉ MARIA CESÁRIO JÚNIOR E ORIENTADA
PELO PROF. DR. VARESE SALVADOR TIMÓTEO E CO-ORIENTADA PELO
PROF. DOUTOR FRANCISCO JOSÉ ARNOLD

PROF. DR. VARESE SALVADOR TIMÓTEO

Limeira

2014

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca da Faculdade de Tecnologia
Vanessa Evelyn Costa - CRB 8/8295

C337m Cesário Júnior, José Maria, 1979-
Um medidor de energia elétrica integrado em redes de comunicações / José Maria Cesário Júnior. – Limeira, SP : [s.n.], 2014.

Orientador: Varese Salvador Timóteo.

Coorientador: Francisco José Arnold.

Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Tecnologia.

1. Redes inteligentes de energia. 2. Arduino (linguagem de programação de computador). 3. Sistema de comunicação sem fio. 4. TCP/IP (protocolo de rede de computação). 5. Sistema global para comunicações móveis. I. Timóteo, Varese Salvador. II. Arnold, Francisco José. III. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Tecnologia. IV. Título.

Informações para Biblioteca Digital

Título em outro idioma: An electricity power meter integrated into communications networks

Palavras-chave em inglês:

Energy smart grid

Arduino (computer programming language)

Wireless communication system

TCP/IP (protocol computing network)

Global system for mobile communications

Área de concentração: Tecnologia e Inovação

Titulação: Mestre em Tecnologia

Banca examinadora:

Varese Salvador Timóteo [Orientador]

Varese Salvador Timóteo

Leonardo Lorenzo Bravo Roger

Benedito René Fischer

Data de defesa: 17-02-2014

Programa de Pós-Graduação: Tecnologia

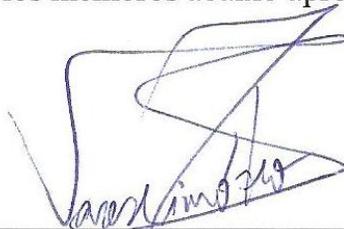
DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM TECNOLOGIA

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: TECNOLOGIA E INOVAÇÃO

**UM MEDIDOR DE ENERGIA ELETRICA INTEGRADO EM REDES DE
COMUNICAÇÕES**

José Maria Cesário Júnior

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Dissertação:



Prof. Dr. Varese Salvador Timóteo
UNICAMP
Presidente



Prof. Dr. Leonardo Lorenzo Bravo Roger
UNICAMP



Prof. Dr. Benedito Rene Fischer
UNESP

RESUMO

A crescente evolução mundial dos sistemas de medição inteligentes, a liberação de regulamentações Brasileiras, incentivando a adoção de sistemas de medição de energia elétrica inteligentes, direcionaram a presente dissertação a propor um sistema composto de um equipamento eletrônico para medição, em tempo real, das grandezas de corrente, tensão e calcular a energia consumida e terá canais de comunicação com as tecnologias Wi-Fi, GSM/GPRS e GPS.

As informações sobre consumo serão disponibilizadas para os usuários finais com o objetivo de mudar o padrão de consumo de energia elétrica, ou até reduzi-lo, através da conscientização e disponibilização das informações de consumo em tempo real.

Palavras-chave: Redes inteligentes de energia, Arduino ((Linguagem de programação de computador), Sistema de comunicação sem fio, TCP/IP, GSM, GPRS, GPS.

ABSTRACT

The growing worldwide trend of smart metering systems, the release of Brazilian regulations, encouraging the adoption of smart electricity metering systems, guided this dissertation to propose a system composed of an electronic device for measuring, in real time, the magnitudes of current, voltage and calculate the consumed power and will have communication channels based on Wi-Fi, GSM /GPRS and GPS technologies.

The consumption information will be made available to end users with the goal of changing the electricity consumption pattern, or even reduce it, through awareness and provision of consumer information in real time.

Keywords: Energy smart grid, Arduino (computer programming language), Wireless communication system, TCP/IP, GSM, GPRS,GPS.

SUMÁRIO

RESUMO	VI
ABSTRACT.....	VII
SUMÁRIO	VIII
AGRADECIMENTO	X
LISTA DE FIGURAS	XI
LISTA DE TABELAS.....	XIII
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	XIV
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. MOTIVAÇÕES E CONTEXTO	5
1.2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	10
1.3. OBJETIVOS.....	12
2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	13
2.1. CONCEITOS DO SISTEMA ELÉTRICO	13
2.2. POTÊNCIA ELÉTRICA	14
2.3. MEDIDORES DE ENERGIA ELÉTRICA	15
2.3.1. MEDIDOR ELETROMECAÂNICO DE INDUÇÃO.....	15
2.3.2. MEDIDOR INTELIGENTE OU SMART METER.....	16
2.4. ELEMENTOS SENSORES PARA MEDIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA	19
2.4.1. SENSORES DE CORRENTE.....	19
2.4.2. SENSORES DE TENSÃO.....	23
3. ARQUITETURA DO SISTEMA	26
3.1. ESTRUTURA GERAL	26
3.2. PROTOCOLOS DE COMUNICAÇÃO.....	29
3.2.1. <i>Protocolos de Comunicação TCP/IP</i>	30
3.2.2. <i>GSM/GPRS</i>	31
4. DESENVOLVIMENTO E IMPLEMENTAÇÃO	32
4.1. MATERIAIS.....	32
4.1.1. <i>Microcontrolador</i>	34
4.1.2. <i>Base de construção do protótipo e Circuito Integrado de medição ADE7753</i>	34

4.1.3.	<i>Interface com a rede elétrica</i>	38
4.1.4.	<i>Sensor de tensão e circuito divisor de tensão</i>	38
4.1.5.	<i>Sensor de corrente e acoplamento resistivo</i>	39
4.1.6.	<i>Placa de comunicação GSM/GPRS Shield</i>	40
4.1.7.	<i>Placa de comunicação Wi-Fi</i>	41
4.1.8.	<i>Placa módulo GPS</i>	41
4.1.9.	<i>Ambiente de desenvolvimento integrado Arduino</i>	42
4.1.10.	<i>Camada de aplicação</i>	43
4.2.	MÉTODO	44
4.2.1.	<i>Casos de teste e metodologia empregada</i>	44
4.2.2.	<i>Teste do Transformador de Corrente</i>	45
4.2.3.	<i>Teste do CI ADE7753</i>	47
4.2.4.	<i>Elaboração do software</i>	50
4.2.5.	<i>Teste das placas de comunicação Wi-Fi shield, GSM/GPRS shield e GPS</i>	52
4.3.	<i>Calibrações</i>	54
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	56
5.1.	RESULTADO DO TESTE DE LINEARIDADE DO TRANSFORMADOR DE CORRENTE.....	56
5.2.	RESULTADO DO TESTE DE PRECISÃO DO PROTÓTIPO.....	57
5.3.	RESULTADO DO TESTE DE COMUNICAÇÃO.....	61
6.	CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS	65
6.1.	COMENTÁRIO FINAIS.....	65
6.2.	TRABALHOS FUTUROS.....	65
6.3.	PRODUÇÕES DECORRENTES DA PESQUISA.....	66
	REFERÊNCIAS	67
	APÊNDICE	72
A.	ESQUEMÁTICO DO PROTÓTIPO.....	72
B.	LISTA DE COMPONENTES ELETRÔNICOS UTILIZADOS NO PROTÓTIPO.....	73
C.	ARDUINO DUEMILANOVE: PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS.....	74
D.	CARACTERÍSTICAS E DIAGRAMA FUNCIONAL DE BLOCOS DO CI ADE7753.....	75
E.	CARACTERÍSTICAS DO TRANSFORMADOR DE CORRENTE SCT-000-030.....	76
F.	CÓDIGO-FONTE/FIRMWARE.....	77

AGRADECIMENTO

Por todo suporte e força, agradeço a todos que contribuíram para conclusão dessa fase que me proporcionou aprender e trocar conhecimentos com pessoas fantásticas. Ao meu orientador Prof. Dr. Varese Salvador Timóteo e meu co-orientador Prof. Dr. Francisco José Arnold que sempre me direcionaram e suportaram com dedicação e conhecimento, os quais foram vitais para a conclusão dessa pesquisa. Também agradeço à todos os professores que tive a oportunidade de participar nas aulas, nas atividades extra-aula e nos processos de qualificação e defesa.

Por toda paciência, suporte e pelo apoio em todos os momentos, agradeço minha esposa Letícia Robert.

Aos meus pais José Maria e Maria Cristina, irmãos Bruna e Eduardo pelo total apoio, compreensão e paciência imensuráveis, que foram combustível para que chegasse até esse momento.

Agradeço o apoio da secretaria acadêmica (Karen e Fátima), aos amigos de mestrado e todos do laboratório de telecomunicações (Ximenes, João, Adriano, Felipe Ferreira e Felipe Koji) que sempre me ajudaram.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1-1: MODELO DE FUNCIONAMENTO DE REDE INTELIGENTE. FONTE [6].....	2
FIGURA 1-2: SISTEMA DE TRANSMISSÃO HORIZONTE – 2012. FONTE [9]	4
FIGURA 1-3: INICIATIVA SMART METERING PROJECTS MAP. FONTE [18].....	8
FIGURA 2-1: MODELO DO SISTEMA ELÉTRICO. FONTE [30].....	13
FIGURA 2-2: DIAGRAMA DO MEDIDOR DE ENERGIA ELETROME CÂNICO. FONTE:ADAPTADO DE [33].....	15
FIGURA 2-3: MEDIDOR DE PONTEIRO. FONTE [34].....	16
FIGURA 2-4: MEDIDOR CICLOMÉTRICO. FONTE [34].....	16
FIGURA 2-5: MEDIDOR SGM1100TM IEC SMART ENERGY METER. FONTE [36].....	17
FIGURA 2-6: DIAGRAMA DE BLOCOS GENÉRICO DE UM SMART METER. FONTE: ADAPTADO DE [37].....	18
FIGURA 2-7: EXEMPLO DE CIRCUITO DE IMPLEMENTAÇÃO DE RESISTOR SHUNT. FONTE [38], P. 172.....	20
FIGURA 2-8: PRINCÍPIO DA BOBINA DE ROGOWSKI. FONTE [38], P. 179.	21
FIGURA 2-9: REPRESENTAÇÃO TEÓRICA DO EFEITO HALL. FONTE [38], P. 173.	21
FIGURA 2-10: EXEMPLO DE FUNCIONAMENTO DE UM TRANSFORMADOR DE CORRENTE CONTÍNUA. FONTE [38], P. 174.	22
FIGURA 2-11: MONTAGEM DE TRANSFORMADOR DE POTENCIAL E CIRCUITO DIVISOR DE TENSÃO. FONTE: ADAPTADO DE [41].....	24
FIGURA 3-1: DIAGRAMA DE BLOCOS DO SISTEMA A SER DESENVOLVIDO. FONTE: AUTOR.....	28
FIGURA 3-2: DIAGRAMA DE BLOCOS DO SISTEMA A SER DESENVOLVIDO. FONTE: AUTOR.....	29
FIGURA 4-1: CIRCUITO INTEGRADO ADE7753. FONTE [51]	35
FIGURA 4-2: DIAGRAMA DE BLOCOS DE UM ADC Σ - Δ . FONTE [51]	36
FIGURA 4-3: DIAGRAMA DE BLOCOS DE REFERÊNCIA. FONTE [52].....	37
FIGURA 4-4: DIAGRAMA DE TESTE PROPOSTO PARA O CIRCUITO INTEGRADO ADE7753. FONTE [51]	37
FIGURA 4-5: DIAGRAMA DO CIRCUITO DIVISOR DE TENSÃO. FONTE: ADAPTADO DE [51].....	39
FIGURA 4-6: TRANSFORMADOR DE CORRENTE 30A. FONTE [54]	39
FIGURA 4-7: DIAGRAMA DE ACOPLAMENTO RESISTIVO. FONTE: ADAPTADO DE [51]	40
FIGURA 4-8: PLACA SHIELD CELLULAR COM MÓDULO SM5100B. FONTE [55].....	40
FIGURA 4-9: PLACA WIFLY WI-FI SHIELD. FONTE [56]	41
FIGURA 4-10: PLACA GPS SHIELD. FONTE [57].....	41
FIGURA 4-11: AMBIENTE DE DESENVOLVIMENTO INTEGRADO ARDUINO. FONTE: CAPTURA DE TELA PELO AUTOR	42
FIGURA 4-12: PÁGINA PRINCIPAL DE CONTROLE DO SERVIÇO XIVELY. FONTE: CAPTURA DE TELA PELO AUTOR	43
FIGURA 4-13: ESQUEMÁTICO DO CIRCUITO DE TESTE DO TRANSFORMADOR DE CORRENTE. FONTE: AUTOR.....	46
FIGURA 4-14: TESTE DO TRANSFORMADOR DE CORRENTE. FONTE: AUTOR	46
FIGURA 4-15: ENERGY SHIELD COM CIRCUITO INTEGRADO ADE7753 [60].....	47

FIGURA 4-16: DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DO PROTÓTIPO. FONTE: AUTOR.....	48
FIGURA 4-17: IMPLEMENTAÇÃO INICIAL NA PLACA DE PROTOTIPAGEM. FONTE: AUTOR.....	49
FIGURA 4-18: IMPLEMENTAÇÃO FINAL NA PLACA DE CIRCUITO IMPRESSO. FONTE: AUTOR	49
FIGURA 4-19: FLUXOGRAMA. FONTE: AUTOR	51
FIGURA 4-20: EXEMPLO DE PADRÃO DE REQUISIÇÃO JSON. FONTE [62]	52
FIGURA 5-1: GRÁFICO DO RESULTADO DO TESTE DE LINEARIDADE DO TRANSFORMADOR DE CORRENTE. FONTE:	
AUTOR	57
FIGURA 5-2: GRÁFICO DO RESULTADO DA COMPARAÇÃO DOS ERROS PERCENTUAIS. FONTE: AUTOR.....	60
FIGURA 5-3: POTÊNCIA DO SINAL WI-FI RESULTANTE DO TESTE 1. FONTE: CAPTURA DE TELA PELO AUTOR	61
FIGURA 5-4: POTÊNCIA DO SINAL WI-FI RESULTANTE DO TESTE 2. FONTE: CAPTURA DE TELA PELO AUTOR	62
FIGURA 5-5: CONEXÃO DO BARRAMENTO SPI MESTRE/ESCRAVO ENTRE PLACAS DE COMUNICAÇÃO. FONTE:	
AUTOR	62
FIGURA 5-6: RESULTADO DE MEDIÇÃO EXIBIDO ATRAVÉS DE MONITOR SERIAL. FONTE: CAPTURA DE TELA PELO	
AUTOR	63
FIGURA 5-7: RESULTADO DE MEDIÇÃO EXIBIDO ATRAVÉS DO SERVIÇO XIVELY. FONTE: CAPTURA DE TELA PELO	
AUTOR	63
FIGURA 5-8: RESULTADO DE MEDIÇÃO EXIBIDO ATRAVÉS DO SERVIÇO XIVELY. FONTE: CAPTURA DE TELA PELO	
AUTOR	64
FIGURA 5-9: LOCALIZAÇÃO GEOGRÁFICA ATRAVÉS DO SERVIÇO XIVELY. FONTE: CAPTURA DE TELA PELO	
AUTOR	64
FIGURA 8-1: PLACA ARDUINO DUEMILANOVE.....	74
FIGURA 8-2: DIAGRAMA DE BLOCOS CI ADE7753	75

LISTA DE TABELAS

TABELA 1-1: CLASSIFICAÇÃO E DISTRIBUIÇÃO DOS MEDIDORES. FONTE [8]	5
TABELA 2-1: CLASSES DE EXATIDÃO DE TRANSFORMADORES DE CORRENTE. FONTE [39].....	23
TABELA 2-2: COMPARAÇÃO ENTRE AS TECNOLOGIAS DE SENSOREAMENTO. FONTE [40]	23
TABELA 2-3: CLASSES DE EXATIDÃO DE TRANSFORMADORES DE POTENCIAL. FONTE [43].....	25
TABELA 4-1: CABEÇALHOS TCP/IP E TAMANHO DE PACOTES. FONTE: AUTOR	53
TABELA 4-2: VALORES DE REFERÊNCIA PARA CALIBRAÇÃO DE VALORES DE CORRENTE. FONTE: AUTOR	54
TABELA 5-1: RESULTADO DO TESTE DE LINEARIDADE DO TRANSFORMADOR DE CORRENTE. FONTE: AUTOR.....	56
TABELA 5-2: RESULTADO DO TESTE 1 DE PRECISÃO DO PROTÓTIPO. FONTE: AUTOR.....	58
TABELA 5-3: RESULTADO DE ERRO PERCENTUAL DO TESTE 1. FONTE: AUTOR	58
TABELA 5-4: RESULTADO DO TESTE 2 DE PRECISÃO DO PROTÓTIPO. FONTE: AUTOR.....	59
TABELA 5-5: RESULTADO DE ERRO PERCENTUAL DO TESTE 2 (CORRENTE PROTÓTIPO CONTRA CORRENTE TEÓRICA CALCULADA). FONTE: AUTOR.....	59
TABELA 5-6: RESULTADO DE ERRO PERCENTUAL DO TESTE 2 (CORRENTE PROTÓTIPO CONTRA AMPERÍMETRO). FONTE: AUTOR.....	60

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABINEE - Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica

AJAX - Asynchronous JavaScript and XML

AMI - Advanced Metering Infrastructure

AMM - Automated Meter Management

AMR - Automated Meter Reading

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica

API - Application Programming Interface

CA - Corrente Alternada

CC - Corrente Contínua

CVS - *Comma-Separated Value*

GIS – Geographic Information System

GPRS - General Packet Radio Service

GPS – Global Positioning System

GSM - Global System for Mobile Communications

IEA - International Energy Agency

JSON - JavaScript Object Notation

LAN - Local Area Network

LCD - Liquid Crystal Display

MDM - Meter Data Management

PGA - Programmable Gain Amplifier

PLC - Power Line Communication

PRODIST - Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional

RF – Rádio frequência

SPI - Serial Peripheral Interface Bus

TCP/IP - Transmission Control Protocol/Internet Protocol

UDP - User Datagram Protocol

WAN - Wide Area Network

WiMAX - Worldwide Interoperability for Microwave Access

1. INTRODUÇÃO

A indústria elétrica e o conjunto de tecnologias que foram desenvolvidas para suportá-la ao longo dos séculos XIX e XX trouxeram para o mundo avanços que a humanidade, no passado, apenas sonhava ou nem sequer imaginava. Hoje, a energia elétrica não nos causa espanto e está tão integrada às nossas vidas, que somente a percebemos quando existe alguma falha na transmissão ou quando recebemos uma conta de energia elétrica muito alta.

A aparente “invisibilidade” da energia elétrica consumida, se dá em parte pelo fato da transmissão da mesma ocorrer por uma rede complexa de geração e distribuição, com vários elementos distintos ao longo da rede envolvendo princípios de organização espacial e territorial complexos. A importância do setor elétrico é muito grande, pois a sociedade contemporânea tem alto nível de dependência dos produtos e serviços relacionados à eletricidade. Da mesma forma, grande parte dos avanços feitos pela indústria tinham foco no aproveitamento da economia de escala e avanço das redes de transmissão, dando pouca consideração na implementação de tecnologias que podem aumentar a eficiência do sistema já instalado [1].

De acordo com o relatório especial sobre sistemas inteligentes da revista *The Economist* [2], existe uma convergência entre os mundos real e digital onde os avanços tecnológicos tornam possível ganhos de eficiência em um cenário que considera uma demanda crescente por energia e recursos naturais, e ao mesmo tempo, respeito pelo meio ambiente.

Assim, a tecnologia conhecida como *smart grid*, ou rede inteligente, aparece como uma nova forma de gerenciar a indústria elétrica e entregar os ganhos de eficiência através de características-chave, tais como instalação de medidores de consumo de energia elétrica inteligentes (permitindo medição em tempo real), utilização e criação de estruturas tarifárias diferenciadas, que levem em conta o consumo e demanda de energia elétrica de acordo com períodos de utilização de pico e vale e capacidade de aproveitamento do potencial de co-geração de energia através de fontes renováveis como energia eólica e solar em pequena escala [3].

Esse conjunto de tecnologias possui componentes que abrangem tecnologias de telecomunicações, informação, sensoriamento e monitoramento de forma que a rede elétrica possa operar com um desempenho melhor, fato que é sustentado por um conjunto de

características [4], como restauração autônoma, suporte à recursos distribuídos, suporte à fontes renováveis de energia, garantia da segurança do fornecimento, suporte à custos baixos de operação, minimização de perdas técnicas e manutenção ou intervenção manual. A Agência Internacional de Energia [5] fornece a seguinte definição de *smart grid* ou rede inteligente:

“Uma rede inteligente é uma rede de eletricidade que usa tecnologia digital para monitorar e gerenciar o transporte de eletricidade a partir de todas as fontes de geração para atender uma variedade de demandas e usuários. Tais redes estarão aptas a coordenar as necessidades e capacidades de todos os geradores, operadores, usuários finais e investidores do mercado de eletricidade de forma a aperfeiçoar a utilização e operação dos ativos no processo, minimizando os custos e impactos ambientais enquanto mantém a confiabilidade, resiliência a estabilidade do sistema.” (tradução nossa).

A Figura 1-1 ilustra o conceito e os elementos de uma rede inteligente:

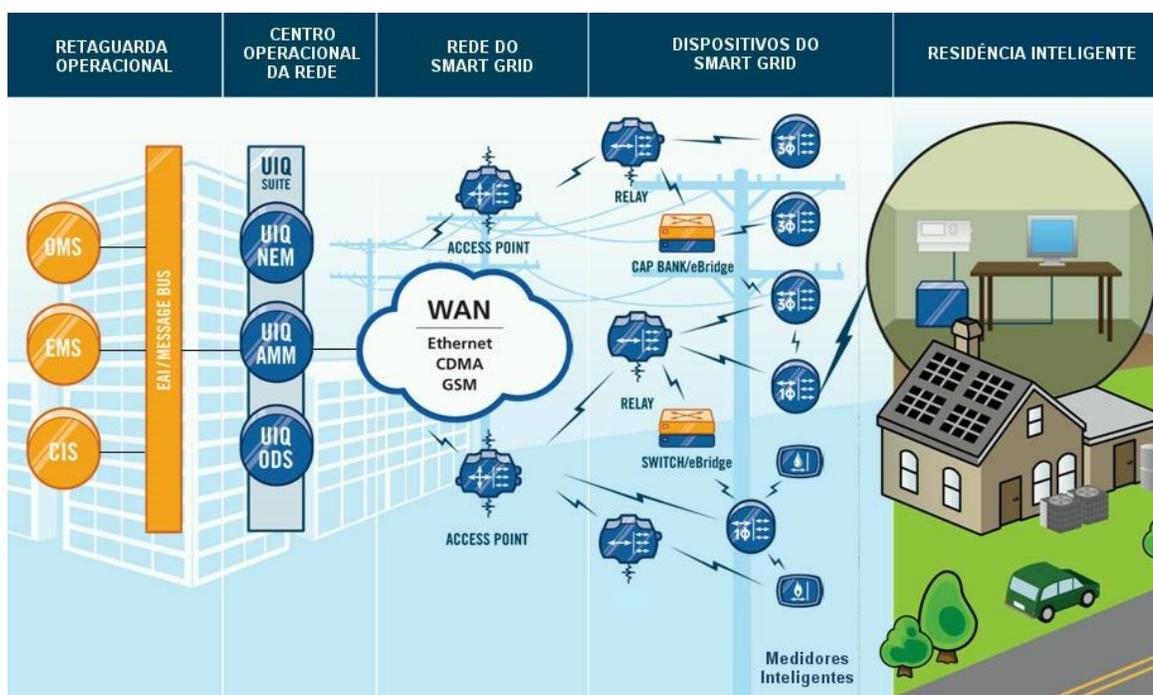


Figura 1-1: Modelo de funcionamento de rede inteligente. Fonte [6]

Dentro desse modelo, as concessionárias de energia elétrica estão adicionando camadas de inteligência digital em sua infra-estrutura, onde as redes elétricas inteligentes usam uma série de dispositivos digitais e ferramentas que possibilitam a automação, monitoração e controle das

operações, desde a geração até o consumo da energia. Em um futuro próximo, será possível adicionar novas fontes de energia ou fontes alternativas como biomassa, energias solar e eólica e até gerenciar múltiplas fontes de energia.

Devido ao fato do setor elétrico, indústria e academia estarem trabalhando ativamente na definição de padrões e regulamentações internacionais, é importante definir os termos de maior relevância nesse contexto [7], a saber:

- **Leitura Automática de Medidor (AMR, *Automated Meter Reading*):** sistema que realiza automaticamente a leitura de dados do medidor e transfere-os unidirecionalmente para uma aplicação consolidadora
- **Infraestrutura de Medição Avançada (AMI, *Advanced Metering Infrastructure*):** é o sistema com capacidade de medição, leitura e validação de dados de uso de energia que conecta-se com medidores inteligentes de energia elétrica, gás, água, calor e outros, por diversos meios de comunicação. O conceito é mais abrangente que AMR, e a transferência de dados é bidirecional.
- **Gerenciamento Avançado de Medidor (AMM, *Advanced Meter Management*):** é a plataforma de gerenciamento de medidores inteligentes distribuídos em redes de comunicação, com característica de tempo de integração inferiores a uma hora. Concentra todas as atividades de monitoração e gerenciamento de ativos.
- **Gerenciamento de Dados do Medidor (MDM, *Meter Data Management*):** tem o objetivo de processar e gerenciar dados gerados pelos medidores e registrar informações complementares além de kWh.
- **Gerenciamento de Dados de Medição (MDM, *Meter Data Management*):** é o sistema que consolida e compara dados e gera relatórios consolidados, além de assegurar qualidade, persistência e distribuição de dados dos ativos aos sistemas que fazem parte da infraestrutura.

Do lado do usuário, teremos uma interação com a rede mais dinâmica e direta, onde o mesmo terá informações sobre o sistema, participando da economia, tendo a possibilidade de saber o gasto instantâneo de energia elétrica, bem como o consumo (conhecido como *smart*

metering). Com essa tecnologia, as companhias de energia elétrica poderão ofertar tarifas diferenciadas baseadas em horários de maior ou menor consumo da população.

É importante enfatizar a diferença existente entre rede inteligente e medição inteligente (*smart metering*), onde a primeira, analisada anteriormente, é muito mais abrangente em tecnologias e soluções que a segunda. Grande parte das empresas e companhias brasileiras está centralizando seus esforços na implantação de medidores inteligentes e é preciso reforçar que a medição inteligente não fornece uma rede inteligente.

Considerando a extensa rede elétrica Brasileira, de dimensões continentais, a proposta de atualização dos ativos da mesma apresenta um desafio relativo à entrega da tecnologia contra o custo da implantação [8]. Na figura 1-2 vemos o sistema de transmissão Brasileiro, onde temos como característica uma rede elétrica de abrangência continental e com complexos de geração de energia relativamente centralizados:

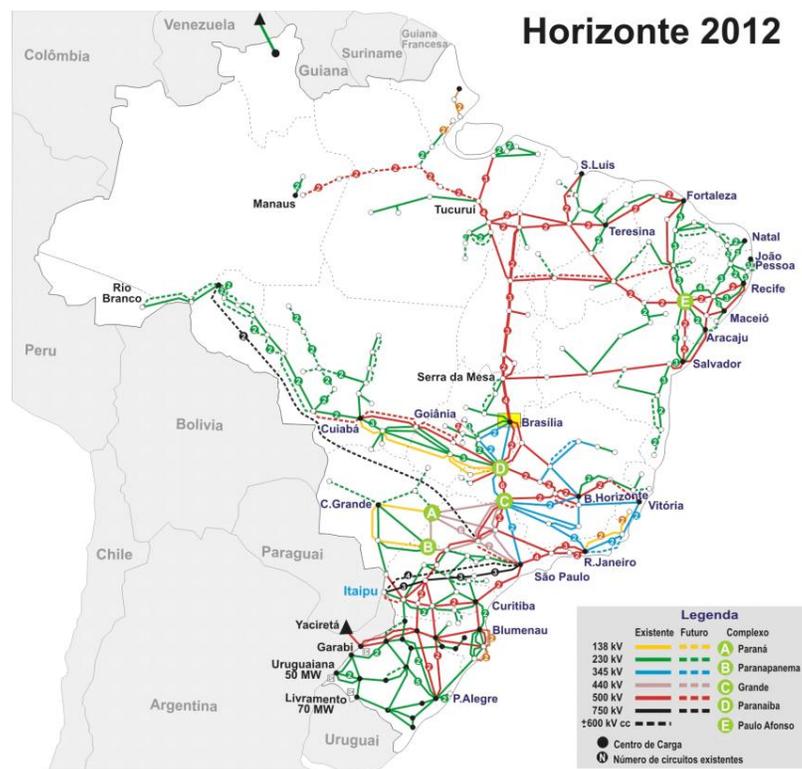


Figura 1-2: Sistema de transmissão Horizonte – 2012. Fonte [9]

O ato de trocar os medidores eletromecânicos instalados no Brasil demonstra que será necessário trabalhar em uma rede de 60.920.860 aparelhos, representando aproximadamente 93%

dos medidores existentes, de acordo com estudo feito pela ANEEL [8]. Segundo a ABINEE [10], o cenário interno prevê a movimentação de três a quatro milhões de medidores por ano, além da previsão de de 2,5 a 3 milhões de novos consumidores e um mercado de substituição em torno de 700 mil a 1 milhão de medidores. Observa-se na Tabela 1-1 a quantidade e tipo de medidores instalados no Brasil em 2009:

Tabela 1-1: Classificação e distribuição dos medidores. Fonte [8]

Situação	Medidores eletromecânicos	Medidores eletrônicos
Em estoque	1.389.074,00	802.626,00
Instalados	59.531.786,00	4.059.975,00
Total Brasil	60.920.860,00	4.862.601,00
%	92,61	7,39

Foi estimado no ano de 2010 [11] que o mercado de medidores residenciais inteligentes poderia movimentar em torno de R\$ 1,8 bilhão por ano no país, com uma estimativa média de custo aproximado de R\$ 200 por equipamento, previsto pela ANEEL, além da previsão de venda de nove milhões de unidades por ano, já incluindo a instalação de novas unidades.

Os fatos citados anteriormente reforçam o grande potencial existente, tanto para pesquisa e desenvolvimento visto que o parque tecnológico para suportar a evolução está em estágio inicial, quanto para o setor comercial e industrial, que irá colaborar com as concessionárias de energia elétrica e todo ecossistema de geração, transmissão e distribuição de energia.

1.1. Motivações e contexto

No dia 7 de agosto de 2012, a diretoria da ANEEL, publicou a Resolução Normativa 502 [12], que regulamenta os requisitos básicos para os sistemas de medição eletrônica de energia elétrica de unidades consumidoras do Grupo B (residencial, rural e demais classes, exceto baixa renda e iluminação pública).

Essa resolução representa um passo importante para a implantação das redes elétricas inteligentes no Brasil e concedeu às distribuidoras 18 meses para oferecer medidores eletrônicos aos consumidores, sendo que a proposta da ANEEL estabelece que podem ser instalados medidores sem custo, oferecido quando o consumidor optar pela modalidade tarifária branca (onde a tarifa varia de acordo com faixas horárias de consumo) e a instalação com custo, onde

será oferecido um medidor mais completo com acesso a informações individualizadas e em tempo real, relativas ao serviço prestado.

A publicação da Resolução Normativa 502 representou um grande passo frente à adoção e convergência para a tecnologia de medição inteligente de energia elétrica, proporcionando ao Brasil integrar o crescente número de países a adotar tecnologias e inovações na área de medição eletrônica. Em vários países é possível identificar iniciativas similares, algumas já datando do ano de 2006 e proporcionando o surgimento de tecnologias relacionadas.

Esse cenário global levou a empresa Google a criar o serviço experimental chamado Google *PowerMeter* (<http://www.google.com/powermeter/about/>) com o objetivo de disponibilizar uma *API* livre com funcionalidades e ferramentas de monitoração de energia elétrica, além de possibilitar que medidores eletrônicos pudessem ser conectados ao serviço.

O serviço suportava a conexão com diversos equipamentos de medição de mercado, além de permitir que protótipos, fruto de pesquisas e iniciativas diversas, usufríssem de um conjunto extenso de aplicações para visualização de gráficos, cálculos de consumo e geração, comparação de uso de energia por período, entre outros. A principal finalidade era fornecer ao consumidor um meio de tomar consciência e visualizar o consumo de energia em tempo real, de forma que o conhecimento detalhado dos picos e vales de consumo pudessem incitar reflexão e mudança de comportamento. O serviço deixou de ser oferecido¹ no mês de Setembro de 2011, e teve como justificativa o fato do serviço não ter crescido conforme esperado, devido ao baixo número de usuários, mas iniciou a discussão de um modelo experimental onde os usuários finalmente tiveram a oportunidade de estabelecer um meio de obter informações sobre o consumo de energia elétrica.

Ainda no ano de 2006, foi analisado que o acesso à informação detalhada e em tempo real do consumo de energia elétrica propicia uma redução média de 15% da energia usada e reforça o fato que, quanto mais iniciativas similares existam, melhor será o uso dos recursos existentes [13].

¹ <http://googleblog.blogspot.com.br/2011/06/update-on-google-health-and-google.html>

De forma similar, o projeto piloto feito pela subsidiária de transmissão e distribuição de energia CenterPoint Energy Houston Electric e o Departamento de Energia dos Estados Unidos [14], mostrou que 71% dos 500 clientes participantes do estudo, informaram que o comportamento e modo de consumir energia foi alterado de alguma forma, como resultado da instalação de dispositivos eletrônicos que informavam o uso de energia doméstica em tempo real.

A iniciativa entre a empresa IBM e a cidade Dubuque conduziu dois projetos pilotos para gerenciamento inteligente de energia elétrica [15] e água [16], onde resultados da segunda iniciativa [17] indicaram uma redução significativa do consumo dos recursos, devido à conscientização e visualização do consumo em tempo real.

Assim, existe uma tendência nos setores de utilidades públicas, principalmente no setor elétrico, que indica que conhecimento do padrão de consumo e informações detalhadas do comportamento do mesmo faz com que o consumidor transforme dados de consumo em informação e conseqüentemente reflita e gere conhecimento que irá permitir o uso mais racional de um recurso que deve ser otimizado mundialmente.

Os países europeus e norte americanos estão na vanguarda da pesquisa e implantação de programas de medição eletrônica, liderando esforços e investimentos nas áreas de medição do consumo de recursos de água, gás e principalmente energia elétrica, tendo em vista que a otimização e monitoração dos mesmos está na agenda da liderança mundial.

Como forma de ilustrar a tendência mundial do uso de dispositivos eletrônicos de medição, a consultoria Engaging Consulting ², do Reino Unido criou um projeto integrado ao *GoogleMaps* chamado *Smart Metering Projects Map* [18] com o objetivo de mostrar as iniciativas mundiais de medição eletrônica em andamento, em conjunto com projetos que são derivados de políticas de eficiência de energia, que podem ser vistas na figura 1-3:

² <http://www.engage-consulting.co.uk/>



Figura 1-3: Iniciativa Smart Metering Projects Map. Fonte [18]

Em um cenário global onde o uso racional dos recursos naturais é cada vez mais sujeito à políticas de eficiência de energia, é importante reforçar que existem riscos associados aos critérios de avaliação do consumo, bem como cada fonte de geração de energia tem suas características que devem ser levadas em conta. A análise do consumo de energia primária deve guiar as políticas de eficiência de energia, e devido a esse fato, ao compartilhar com o consumidor final dados de seu consumo, é possível trazer todos os envolvidos para a discussão dessas políticas e compartilhar a responsabilidade da gestão dos recursos da matriz de energia [19].

Para que o usuário possa assumir essa responsabilidade, será necessária interação com os dados, algo que não é possível atualmente. Assim, a primeira vantagem será a possibilidade de monitorar e acompanhar o desempenho elétrico da unidade consumidora (seja uma residência ou outra instalação) via dispositivos móveis, Internet, celular e computadores, além de possibilitar a consulta de horários onde a energia está mais barata para o consumo e ajudará o consumidor a reduzir o valor da conta de energia elétrica ou otimizar o consumo da própria energia. Ao analisar os benefícios para as concessionárias de energia elétrica, as operações de elevada complexidade poderão ser otimizadas, como por exemplo atividades de manutenção, onde não mais existirá a

dependência de chamados de clientes para informar falhas na rede, ou problemas de localização, pois sistemas de gestão de ativos podem enviar alertas e mensagens de falhas operacionais ou estruturais com a localização e o tipo de equipamento danificado. Finalmente, tecnologias como GPS podem auxiliar o gerenciamento dos ativos de rede (medidores, unidades consumidoras, transformadores e outros).

Os sistemas de monitoração podem trabalhar de forma pró-ativa, antecipando a manutenção de equipamentos, de forma a reduzir custos operacionais e aumentando a confiabilidade da rede e leitura dos medidores, feita manualmente, será totalmente automatizada através dos módulos de comunicação e despacho. Outros fatores de alta relevância são o controle de perdas técnicas, análise e gestão de fraudes, segurança da rede e furto de energia elétrica, que poderão ser otimizados.

Esse conjunto de tecnologias pavimentarão um caminho adequado para o novo cenário do setor energético em nosso país, porém o legado dos medidores convencionais não pode ser esquecido, que não serão migrados imediatamente, dessa forma, estudar e desenvolver alternativas e soluções mais acessíveis, justificam o desenvolvimento de um sistema complementar, que atuará como um conector entre o sistema atual e o novo.

O sistema complementar contará com dispositivos de baixo custo, tecnologias não-invasivas de medição além de poder coletar e transmitir dados através de tecnologias de comunicação e infra-estrutura já existentes, como as redes de telefonia celular GSM/GPRS, redes de abrangência geográficas (*Wi-Fi e WiMAX*). A complementariedade se dará pelo fato de que o protótipo irá prover o consumo de energia elétrica em tempo real e o total acumulado, que depois pode ser comparado com o resultado apurado pelo medidor convencional.

Ao consolidar as características discutidas, espera-se um custo adequado de implantação dos medidores inteligentes complementares, pois eles possibilitarão uma sinergia com os recursos de redes de informação já existentes, garantindo economia de escala e viabilizando economicamente a implantação do sistema inteligente, oferecendo todas as vantagens acima, que não existem no sistema elétrico atual.

1.2. Revisão Bibliográfica

A pesquisa e desenvolvimento de tecnologias relacionadas a medição eletrônica inteligente tem aumentado a cada ano, onde é possível encontrar propostas que estudam as características teóricas do assunto.

Porém, para conduzir um estudo mais profundo, é interessante concentrar esforços para aplicar os conceitos de forma prática, onde protótipos de medição são fundamentais. Esses protótipos podem utilizar um conjunto de técnicas e materiais já consagrados no campo de medição, e cada uma delas tem características que melhor se adaptam ao objetivo a ser desenvolvido e podem ser vistos a seguir.

Em uma proposta de implementação um protótipo de baixo custo para medição de temperatura e corrente [20], que pode ser distribuído e instalado por companhias de utilidades públicas, utilizou-se a tecnologia *ZigBee* de comunicação sem fio e radiofrequência, além de trabalhar com o conceito de *energy harvesting*, ou colheita de energia, que tem o fundamento na captação de baixas quantidades de energia (vibração, térmica, solar, campos elétricos e outras) que existem no ambiente de forma a prover energia para sistemas de baixo consumo. Com esse conceito, nós de uma rede de medidores inteligentes podem utilizar o próprio campo da corrente magnética a ser medida como forma de se auto-alimentarem, além da possibilidade de utilizar a mesma energia para carregar baterias do próprio dispositivo.

Também analisou-se o desenvolvimento de um dispositivo de medição de defasagem entre tensão e corrente, que usa transmissão de dados via GPRS [21]. A medição do sinal de entrada de tensão é feita diretamente da rede de energia elétrica, que utiliza 120V e 60Hz de frequência e a leitura do sinal de corrente é feita através de um sensor de efeito Hall (ACS714) de malha aberta com faixa operacional que varia de 0 até +/-5A.

Ainda no campo da comunicação, revisou-se o estudo experimental feito na República Popular da China para a monitoração e segurança da rede física e dos ativos, que é parte da Infraestrutura de Medição Avançada da rede de energia elétrica [22]. Para isso, foi construído um sistema de segurança baseado na transmissão de imagens, de forma integrada ao ambiente de monitoramento da rede inteligente de energia elétrica.

Atendendo a proposta Européia do projeto OPEN Meter [23], que se baseia na existência de padrões abertos e públicos de uma Infraestrutura de Medição Avançada da rede de energia elétrica, foi desenvolvido como prova de conceito um sistema de medição de energia elétrica inteligente [24], composto de uma unidade concentradora/controladora e de dispositivos sensores remotos, que utilizam a conexão sem fio Wi-Fi, em uma rede local.

No campo das soluções de medição de voltagem e corrente, foi analisada uma pesquisa de técnicas de medição, onde existe a possibilidade de utilizar sensores óticos, bobinas com núcleo de ar, divisores capacitivos e/ou resistivos, sensores de efeito Hall e soluções híbridas. A base da proposta [25] é relacionada à medição e calibração de instrumentos de alta voltagem, característica que não foi aplicável à presente dissertação, mas considerada como informação complementar.

Dentro do campo de instrumentação e sensoreamento das redes inteligentes, foi feita a análise de transformadores de corrente como forma de medição de corrente em linhas de transmissão de potência e menciona a saturação do núcleo dos transformadores tradicionais, que pode ocorrer por histerese magnética [26]. Assim, é proposto um micro sensor de corrente, que devido às suas características, não sofrerá com problemas de saturação (dentro de uma determinada faixa de amperagem) e poderá ser usado como dispositivo inteligente de proteção ou como medidor digital de corrente para redes inteligentes.

Seguindo a análise de transformadores de corrente, outra discussão [27] reforça o fato de que a medição da corrente é fator fundamental para fornecimento de dados para medidores inteligentes, e as limitações conhecidas dos mesmos podem comprometer a confiabilidade do sistema de medição. Assim, é proposta uma forma alternativa de medição do próprio campo magnético produzido pela corrente primária de um transformador, sendo foram consideradas para a presente dissertação os estudos relativos aos problemas inerentes aos transformadores de corrente.

Durante a revisão, foi encontrado um projeto muito popular, denominado OpenEnergyMonitor [28], que é distribuído em plataforma livre (hardware e software open-source) e tem como principal objetivo divulgar e desenvolver os conceitos e ferramentas de monitoramento de energia. Foi concebido com a abordagem de medição de corrente através de circuitos resistivos divisores de corrente e tensão e apresentam relativa precisão, para o propósito

do projeto. O processamento e coordenação é feito através da plataforma aberta Arduino, como forma de prototipação e prova de conceito e também possui uma versão comercial, adaptada para medir tanto o consumo como a geração de energia elétrica.

Como fechamento da revisão bibliográfica, foi dedicada atenção especial para o projeto [29], pois apresentou uma evolução nos circuitos de medição, além do desenvolvimento e implementação de uma rede de sensores de energia elétrica que pode ser facilmente instalada para medir e controlar o uso de energia de cada aparelho em uma casa, apresentando um relatório detalhado de consumo de energia gasta pelos dispositivos monitorados (TV, luzes, chuveiros).

As unidades de medição e coordenação formam uma rede sem fio, que é capaz de medir a energia elétrica e gravar os dados de cada aparelho na memória *flash* do coordenador. Os dados armazenados no coordenador são enviados (através de uma ligação sem fios) para um computador onde a análise dos dados é realizada e um relatório detalhado do consumo de energia é apresentado. O diferencial desse projeto foi o uso de um circuito integrado de medição de energia AD71056 (empresa Analog Devices), que apresenta grande acurácia nos resultados de medição.

1.3. Objetivos

Desenvolver um sistema de medição de energia elétrica complementar ao sistema de medição convencional, para ser usado em instalações monofásicas, com tensão fase e neutro de 127 V e capacidade de medição de correntes até 4A.

Testar o sistema com diferentes cargas e transmitir as grandezas medidas de corrente e tensão, além da grandeza calculada de potência consumida para uma aplicação Web através de placa sem fio padrão 802.11b e placa modem GSM/GPRS.

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

A indústria elétrica e o conjunto de tecnologias que foram desenvolvidas para suportá-la ao longo dos séculos XIX e XX trouxeram para o mundo avanços que a raça humana, no passado, apenas sonhava ou nem sequer imaginava. Hoje, a energia elétrica não nos causa espanto e está tão integrada à nossas vidas, que somente a percebemos quando existe alguma falha na transmissão ou quando recebemos uma conta de energia elétrica muito alta.

2.1. Conceitos do Sistema Elétrico

A base do atual sistema elétrico inicia-se em usinas de geração que transmitem energia elétrica por meio de sistemas de transmissão de alta tensão, que por sua vez é distribuída para sistemas de distribuição de média e baixa tensão. Normalmente, o fluxo de energia tem direção única (do gerador para o consumidor) e é enviada e controlada por centros de despacho. A Figura 2-1 resume o modelo do sistema elétrico:

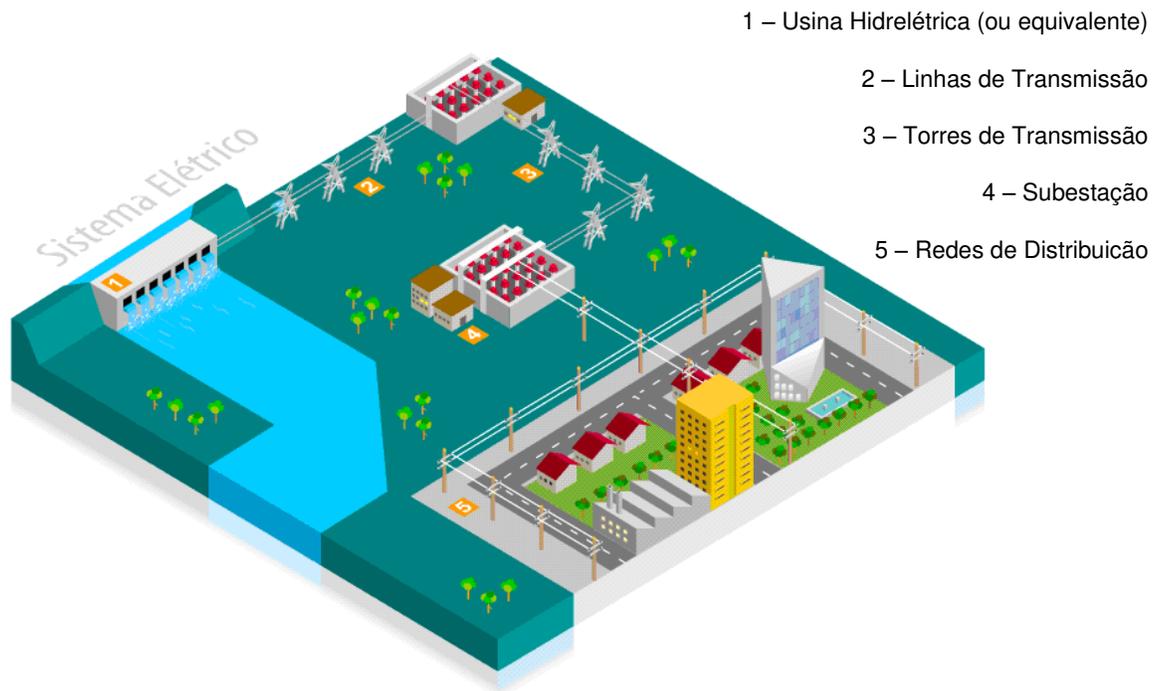


Figura 2-1: Modelo do sistema elétrico. Fonte [30]

O detalhamento dos processos que normatizam e padronizam as atividades técnicas relacionadas ao funcionamento e desempenho dos sistemas de distribuição de energia elétrica no

Brasil podem ser encontrados no site da ANEEL, no documento Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST [31].

2.2. Potência Elétrica

Define-se potência elétrica [32] como o resultado do produto da ação da tensão elétrica aplicada ao circuito pela intensidade da corrente elétrica que por ele circula. A potência é um parâmetro que determina a rapidez com que a energia é consumida.

A potência elétrica P indica quanto trabalho ε (ou energia) é realizado em um intervalo de tempo Δt , conforme descrito na equação 1:

$$P = \frac{\varepsilon}{\Delta t} \quad (1)$$

De forma alternativa, pode-se calcular a potência através do produto da tensão U e da corrente I no circuito, obtendo-se a quantidade de energia transferida por uma fonte em um intervalo de tempo, representado na equação 2:

$$P_{inst}(t) = U(t) \cdot i(t) \quad (2)$$

A unidade de medida da potência é o watt (W), e de acordo com a equação 2, a potência também pode ser expressa em joule por segundo (J/s). Para a obtenção do consumo da energia elétrica ε , rearranja-se os termos da equação 1:

$$\varepsilon = P \cdot \Delta t \quad (3)$$

A unidade de medida do consumo de energia elétrica é o watt-segundo (W x s) ou o joule (J) e utiliza-se o medidor de consumo, conhecido de forma popular como “relógio”, instalado na entrada de unidades consumidoras de baixa tensão. Normalmente a periodicidade de medição é mensal, e para diminuir o valor numérico da grandeza medida, usa-se um múltiplo, o quilowatt-hora (kWh), que corresponde equivale a 1.000 Wh ou $3,6 \times 10^6$ joules .

2.3. Medidores de Energia Elétrica

Os medidores podem ser de dois tipos: eletromecânico, que funciona pelo princípio da indução eletromagnética, e eletrônico, que faz uso de circuitos integrados.

Dentro da faixa de consumo de baixa tensão, normalmente é utilizado o medidor de indução, conhecido por essa denominação por ter funcionamento idêntico ao de um motor de indução. Alguns desses medidores possuem mostradores eletrônicos, porém a forma de medição permanece a mesma.

2.3.1. Medidor eletromecânico de indução

O medidor eletromecânico de indução basicamente é composto de um motor cujo o torque é proporcional ao fluxo de energia passando por ele, e um disco de referência conectado a esse motor. Através do princípio das correntes de Foucault³ induzidas no motor e disco, a interação eletromagnética entre as correntes induzidas produzirá uma força que fará o conjunto girar, e um registrador que conta o número de revoluções do motor converterá em seu equivalente em watts por hora. A figura 2-2 mostra um diagrama simplificado do medidor:

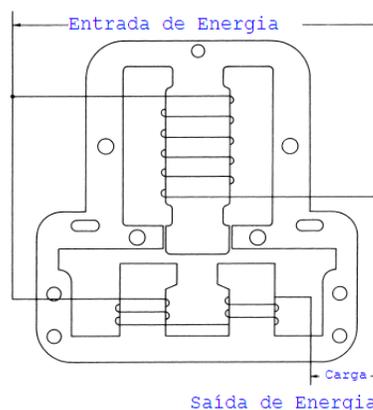


Figura 2-2: Diagrama do medidor de energia eletromecânico. Fonte:adaptado de [33]

O medidor de energia elétrica de uma residência é normalmente encontrado em duas configurações: ponteiros e ciclométrico. O medidor de ponteiros é composto por quatro ou cinco círculos com números semelhantes a um relógio e o valor do número registrado da leitura

³ Corrente induzida em um material condutor quando sujeito a um fluxo magnético variável.

depende da posição em que se encontra o ponteiro. Na figura 2-3, pode-se ver a representação desse medidor:

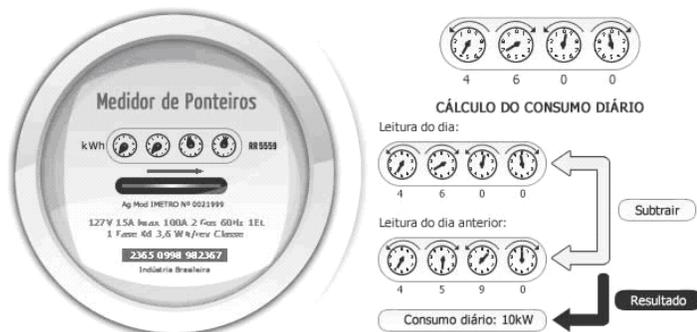


Figura 2-3: Medidor de ponteiro. Fonte [34]

Já o medidor de energia elétrica ciclométrico tem um painel numérico que apresenta a leitura do consumo acumulado e o número é indicado no mostrador, conforme figura 2-4:



Figura 2-4: Medidor ciclométrico. Fonte [34]

2.3.2. Medidor inteligente ou Smart Meter

Apesar de medidores inteligentes ou *Smart Meters* já estarem disponíveis no mercado global, a definição de conceitos e tecnologias do mesmo estão em pleno desenvolvimento, onde empresas de todos os tamanhos, institutos de pesquisa, Universidades e mesmo desenvolvedores independentes estão trabalhando na construção e melhoria de dispositivos que serão parte do conceito amplo de *Smart Grid*.

Existem várias definições de medidores inteligentes e de sua constituição física, funcionalidades e meios de comunicação, onde pode-se destacar as seguintes características que definem um medidor inteligente [35]:

- Registrar em tempo real, ou próximo do real, o uso da eletricidade e a possibilidade de sua geração;
- Oferecer a possibilidade de ler as informações no local ou remotamente;
- Conectar com dispositivos pré-definidos;
- Ler outros consumos como água e gás;
- Limitar o consumo pelo medidor inteligente (em casos extremos cortar o fornecimento de energia).

Grandes empresas globais como Alstom, Siemens, ABB, GE e outras já possuem versões comerciais para medidores inteligentes. A figura 2-5 mostra um smart meter residencial da empresa GE:



Figura 2-5: Medidor SGM1100TM IEC Smart Energy Meter. Fonte [36]

Geralmente os medidores inteligentes possuem vários componentes com o objetivo de entregar uma ou mais características citadas anteriormente. Dessa forma, um microcontrolador fará o papel de coordenador dos seguintes blocos:

- Exibição de dados: através de uma tela (por exemplo LCD), serão exibidos os dados de consumo e demais parâmetros necessários;

- Comunicação: tanto as concessionárias quanto os consumidores devem ser capazes de ler os dados de consumo através de conexões cabeadas e sem cabos de forma automática e remota usando soluções de comunicação diferentes, como TCP/IP, RF, PLC e/ou GPRS;
- Sensores e sensores de fase: algumas grandezas podem ser medidas (como temperatura) e deve ser possível medir uma, duas ou três fases, (por fase entende-se o cabo físico que transporta a corrente) obtendo valores em tempo real de tensão e corrente a serem medidas;

Na figura 2-6, pode-se ver um diagrama de blocos genérico que representa as possíveis características (não se limitando a) e periféricos que podem ser gerenciados pelo microcontrolador:

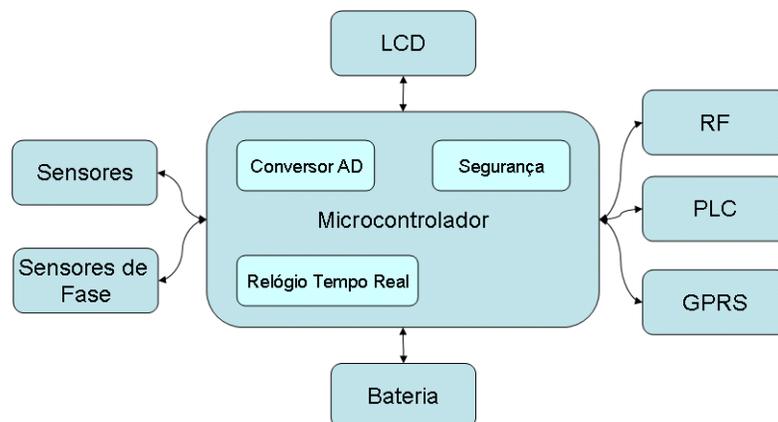


Figura 2-6: Diagrama de blocos genérico de um smart meter. Fonte: adaptado de [37]

A medição eletrônica de energia elétrica tem como base a equação 4, implementada de forma computacional, por meio de algoritmos e que pode ser vista como a integração, em função do tempo, do produto das medições de tensão (V) e corrente (I):

$$E = \int V \cdot i \cdot dt \quad (4)$$

As medições de tensão e corrente podem ser feitas, respectivamente, através de um divisor resistivo e/ou transformador de potencial e uma entrada de corrente, como resistor shunt,

transformador de corrente, bobinas de Rogowski ou sensores de efeito Hall, sendo que esses métodos serão descritos na seção posterior.

Os sinais condicionados de tensão e corrente são enviados ao microcontrolador e ao conversor Analógico Digital, sendo finalmente tratados via software de forma a obter os resultados desejados.

2.4. Elementos sensores para medição de energia elétrica

Sensores são dispositivos que convertem uma grandeza física em um sistema de medição e são geralmente definidos como um dispositivo que recebe e responde a um estímulo ou a um sinal [38]. Muitas vezes um sensor é composto de um transdutor, que é um dispositivo conversor de um tipo de energia em outra que não necessariamente um sinal elétrico e outra parte que converte a energia resultante em um sinal elétrico. São funções características de um elemento sensor:

- Função de transferência: estabelece a relação entre o sinal de entrada (grandeza a ser medida) e o sinal de saída, sendo sempre possível determinar uma função de transferência ideal para um sensor;
- Saturação: todos os sensores têm limites de funcionamento a partir dos quais perdem sua linearidade;
- Impedância: para uma saída em tensão, a impedância de saída deve ser baixa e a impedância de entrada deve ser alta. Por outro lado, para saída em corrente, a impedância de saída deve ser alta e a entrada deve ser baixa;
- Excitação: especifica quais as grandezas necessárias ao funcionamento de um sensor. Para alguns tipos de sensores é importante saber a especificação da resposta, da frequência e qual a estabilidade necessária ao sinal de excitação.

As características da aplicação também podem influenciar na escolha dos sensores a utilizar e fatores como desenho, peso, dimensões e preço são determinantes na escolha dos mesmos.

2.4.1. Sensores de corrente

Existem várias técnicas de medição de corrente e para que a última possa ser medida de forma satisfatória, é preciso fornecer os níveis de corrente elétrica de acordo com os requisitos de

entrada do circuito de medição. Destacam-se, na sequência, os dispositivos e técnicas mais utilizados que foram observados na revisão bibliográfica.

A primeira técnica de sensoriamento é baseada na utilização do resistor Shunt, mede a intensidade de corrente obtida pela lei de Ohm (Equação 5), tomando como base a queda de tensão medida na resistência.

$$V(t) = R \cdot i(t) \quad (5)$$

Onde: I é a corrente elétrica eficaz, em ampéres [A];

V é a tensão elétrica eficaz, em volts [V];

R é o valor da resistência, nesse caso o valor do resistor shunt.

Basicamente, introduz-se uma resistência de valor conhecido e baixo em série com o circuito, conforme visto na figura 2-7:

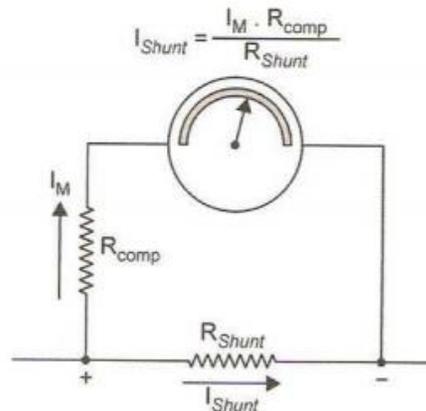


Figura 2-7: Exemplo de circuito de implementação de resistor shunt. Fonte [38], p. 172.

É um dos métodos de medição mais utilizados, apesar de algumas características negativas:

- Aquecimento do resistor provocado por alta corrente;
- O sistema de medida pode ter problemas de isolamento elétrica devido à tensão;
- Efeito pelicular (Skin) provocado por altas frequências.

A segunda técnica de sensoriamento é baseada no uso da bobina Rogowski, que consiste de um núcleo toroidal, montado em torno de um condutor, de forma que o campo magnético produzido pela corrente alternada no condutor induz uma tensão na bobina, conforme figura 2-8:

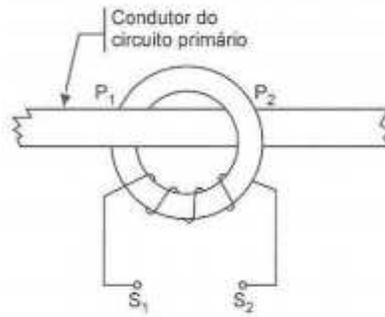


Figura 2-8: Princípio da bobina de Rogowski. Fonte [38], p. 179.

A faixa de medição da Bobina Rogowski inicia-se na unidade de mA e vai até a unidade de kA. Como características positivas, temos:

- A bobina não apresenta histerese, pois seu núcleo é de material não magnético;
- Possui boa linearidade;
- Baixa variação do sinal da saída com a temperatura;
- A indutância mútua não depende da corrente nem da frequência do sinal a medir.

Apenas a limitação de frequência, que é determinada pela ressonância da bobina e a característica invasiva aparecem como pequenas desvantagens.

A terceira técnica de sensoriamento é baseada no efeito Hall, utilizando sensores compostos basicamente de uma pastilha retangular de material condutor para conduzir corrente, posicionado em uma região de campo magnético, medindo a densidade de fluxo magnético, conforme figura 2-9:

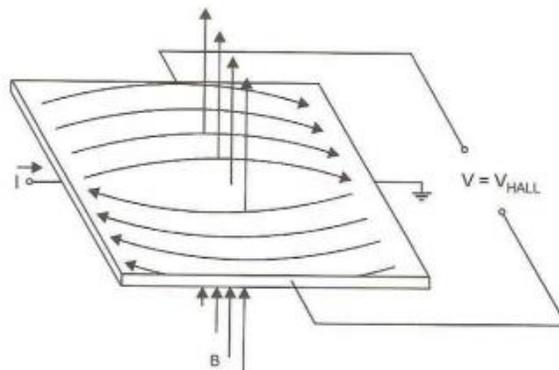


Figura 2-9: Representação teórica do efeito Hall. Fonte [38], p. 173.

A quarta técnica de sensoreamento é baseada em transformador de corrente que transforma a corrente que circula em um enrolamento primário, através de um acoplamento magnético, em uma corrente induzida no secundário, conforme figura 2-10:

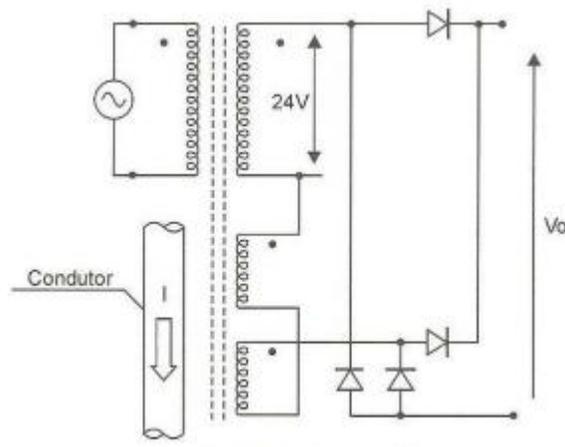


Figura 2-10: Exemplo de funcionamento de um transformador de corrente contínua. Fonte [38], p. 174.

Os transformadores de corrente, também chamados de transformadores de instrumentos, são utilizados em aplicações de alta corrente e têm a função de fornecer correntes proporcionais às medidas no circuito primário de potência, mas suficientemente reduzidas e isoladas galvanicamente de forma a possibilitar a medição por equipamentos de proteção e medição. Os tipo de transformadores de corrente são classificados da seguinte forma:

- Primeiro nível: de acordo com o modelo do enrolamento primário, normalmente constituído por poucas espiras feitas por condutor de cobre de elevada secção;
- Segundo nível: pelo enrolamento secundário, constituído por uma bobina com derivações ou múltiplas bobinas ligadas em série e/ou paralelo.

Existem vários modelos de transformadores de corrente como tipo barra, tipo bucha, tipo janela, tipo núcleo dividido, tipo com vários enrolamentos primários, tipo com vários núcleos, entre outros. As seguintes classes de exatidão padronizadas por classe de aplicação podem ser vistas na tabela 2-1:

Tabela 2-1: Classes de exatidão de transformadores de corrente. Fonte [39]

Classe de exatidão (%)	Aplicação
Melhor que 0,3%	TC padrão; Medições e laboratório; Medições especiais;
0,3%	Medição de energia elétrica para faturamento ao consumidor
0,6% ou 1,2%	Medição de energia elétrica sem finalidade de faturamento ao consumidor; Alimentação de instrumentos de controle: Voltímetro, Wattímetro, Varímetro, frequencímetro, etc.

De acordo com a tabela 2-2, é possível observar a comparação entre os diferentes tipos de tecnologias de sensoriamento de corrente, e utilizar os parâmetros como guia e forma de seleção de tecnologia:

Tabela 2-2: Comparação entre as tecnologias de sensoreamento. Fonte [40]

Tecnologia	Resistor Shunt	Transformador de corrente	Sensor de efeito Hall	Bobina de Rogowski
Custo	Muito baixo	Médio	Alto	Baixo
Linearidade	Muito boa	Média	Baixa	Muito Alta
Capacidade de medição de altas correntes	Muito pobre	Boa	Boa	Muito boa
Consumo de energia	Alto	Baixo	Médio	Baixo
Problema de saturação com altas correntes DC	Não	Sim	Sim	Não
Variação de saída com temperatura	Médio	Baixo	Alto	Muito baixo
Problema de offset de DC	Sim	Não	Sim	Não
Problemas de saturação e histerise	Não	Sim	Sim	Não

2.4.2. Sensores de tensão

Para condicionar o sinal de tensão recebido da rede elétrica, é preciso transformá-lo para que sejam atendidas as características do dispositivo que irá tratar o sinal resultante do condicionamento. Normalmente o sinal condicionado será enviado para um microcontrolador, que pode trabalhar com tensão positiva entre 0V e uma tensão de referência CA (geralmente 5V ou 3.3V).

Uma das soluções é utilizar um transformador de potencial como forma de reduzir a tensão proveniente da rede (por exemplo, 127V para 9V, 5V ou 3.3V). O circuito de condicionamento de sinal deve converter a saída do transformador de potência de forma que a onda tenha um pico positivo menor que 5V e um pico negativo maior que 0V (ou a respectiva tensão de entrada esperada pelo microcontrolador ou dispositivo em questão) e, portanto, é preciso reduzir a tensão enviada pelo transformador de tensão e posteriormente adicionar uma compensação de modo que não exista componente negativo no sinal.

O sinal pode ser reduzido por meio de um circuito divisor de tensão que receberá o sinal através de um transformador de potencial, como visto na figura 2-11:

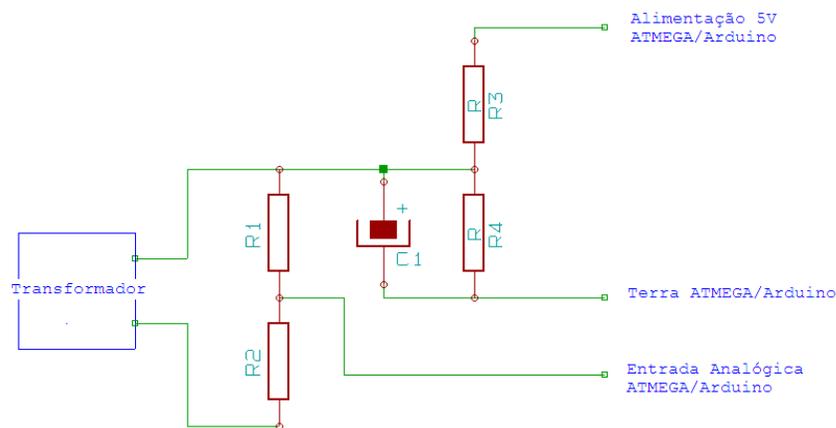


Figura 2-11: Montagem de transformador de potencial e circuito divisor de tensão. Fonte: adaptado de [41]

Um transformador de potencial [42] é um transformador para instrumentação cujo enrolamento primário é ligado em derivação com um circuito elétrico e cujo enrolamento secundário se destina a alimentar bobinas de potencial de instrumentos elétricos de medição, controle ou proteção.

Na prática, o transformador de potencial é considerado um redutor de tensão, pois a tensão no seu circuito secundário é normalmente menor que a tensão no seu enrolamento primário, e são baseados em relações, sendo as principais:

- Relação Nominal: é definida entre os valores nominais das tensões primárias e secundárias, respectivamente, tensões estas para as quais o transformador de potencial foi projetado e construído;

- Relação Real: é definida entre o valor exato de uma tensão qualquer aplicada ao primário do transformador de potencial e o correspondente valor exato da tensão verificada no secundário do transformador de potencial;
- Fator de correção: é a razão entre a relação nominal e a relação real do transformador de potencial. Na prática mede-se o valor da tensão no secundário do transformador de potencial com um voltímetro e multiplica este valor pela relação nominal. Este valor representa o valor medido da tensão primária, e não seu valor exato.

Para aplicação dos transformadores de potencial, a norma técnica [43] define as condições de uso baseadas em valores de classe de exatidão, que podem ser vistas na tabela 2-3:

Tabela 2-3: Classes de exatidão de transformadores de potencial. Fonte [43]

Classe de exatidão (%)	Aplicação
Melhor que 0,3%	Transformador de potencial padrão; Medições e laboratório; Medições especiais.
0,3%	Medição de energia elétrica para faturamento ao consumidor.
0,6% ou 1,2%	Medição de energia elétrica sem finalidade de faturamento ao consumidor; Alimentação de instrumentos de controle: voltímetro, Wattímetro, Varímetro, e frequencímetro.

3. ARQUITETURA DO SISTEMA

A arquitetura do sistema compreende a descrição dos principais componentes do ambiente de desenvolvimento do medidor de energia elétrica e dos meios de comunicações envolvidos, bem como dos requisitos funcionais, não-funcionais e limitações da proposta. Essa arquitetura proposta é o guia para o desenvolvimento e implementação do ambiente e do protótipo, sendo também base para validação dos mesmos.

3.1. Estrutura Geral

Para a implementação do sistema de medição de energia elétrica e dos sistemas de comunicação é necessário definir a estrutura global e os subsistemas utilizados. Baseado no modelo atual das companhias elétricas, definiram-se três subsistemas para a implementação: a empresa distribuidora de energia elétrica, os meios de comunicação e o medidor de energia elétrica (que representa cada unidade consumidora) que são foco da implementação.

Os sistemas das companhias elétricas tem funcionamento análogo à concentradores, onde mensalmente o consumo de energia elétrica de cada unidade consumidora é capturado e consolidado, e posteriormente compartilhado com o usuário final. Dessa forma, é preciso que exista um subsistema, representando a empresa distribuidora de energia elétrica através de uma aplicação de software, capaz de gerenciar, concentrar e exibir o consumo obtido de cada unidade consumidora, considerando o conceito de telemetria e as possíveis restrições associadas [44], que tenha as seguintes características:

- Possibilidade de identificação única e segurança mínima garantida por usuário e senha;
- Possibilidade de comunicação via protocolo TCP/IP e GSM/GPRS;
- Visualização simplificada por meio de indicação textual das grandezas de corrente e tensão;
- Visualização gráfica em forma de curva de consumo, corrente e tensão, acumulativa, em função do tempo.

Já o medidor de energia elétrica, que representa cada unidade consumidora, deve atender os seguintes requisitos:

- Medição das grandezas de corrente e tensão de possíveis unidades consumidoras de baixa tensão (classe B) em circuitos monofásicos;
- Cálculo da potência consumida;
- O meio de sensoriamento para obtenção das grandezas deve ser não invasivo, ou seja, os circuitos não devem ser interrompidos, nem ter contato direto com conexões elétricas;
- Integridade no processo de aquisição de dados;
- Integridade no processo de comunicação, com garantia de meios alternativos de comunicação;
- Disponibilização das grandezas lidas em tempo real para cada unidade consumidora;
- Possibilidade de comunicação via protocolo TCP/IP e GSM/GPRS;
- Possibilidade de gestão de ativos, através de geolocalização.

Como restrições e limites do medidor de energia elétrica, reforça-se que será complementar ao sistema de medição convencional e não será usado para fins de faturamento. Também será usado em instalações monofásicas, com tensão fase e neutro de 127 V e capacidade de medição de correntes até 4A (a especificação do transformador de corrente limita a medição até 30A).

Como o presente projeto é destinado à medição de sistemas monofásicos (baixa tensão), será levado em consideração a revisão 2 do Módulo 5 - Sistemas de Medição do PRODIST, conforme regulamentação da ANEEL [45].

Dentre os vários métodos para medição de energia, vistos no capítulo 2, seção 2.3, será adotado um método eletrônico, através de circuitos integrados de medição com o objetivo de reduzir os erros decorrentes do uso de componentes tradicionais e também como meio de simplificação do projeto de hardware e software.

Seguindo a estrutura, selecionaram-se os meios físicos de comunicação para serem incorporados ao sistema: o uso de redes GSM, conectadas através de um modem GSM/GPRS, que representa grande vantagem devido ao fato de que as mesmas já estão disponíveis em grande parte das localidades e o uso de uma conexão de Internet já existente em uma rede de área local, através de conexões sem fio e os respectivos meios físicos de conexão.

Dessa forma, com a agregação dos sistemas e subsistemas propostos é possível observar na figura 3-1 a arquitetura proposta para o sistema:



Figura 3-1: Diagrama de blocos do sistema a ser desenvolvido. Fonte: Autor

Para o sistema concentrador será utilizado um serviço de Internet das Coisas [46] composto de uma plataforma aberta e uma API que possibilita que dispositivos possam ser conectados à Internet de forma rápida e transparente, através de tecnologias de programação convencionais (protocolo HTTP, formato JSON, formato CVS) com autenticação via usuário, senha e chave criptografada.

Para o sistema de medição, teremos os seguintes blocos de componentes:

- Sensores/transdutores: serão utilizados transformadores de corrente e transformadores de potencial, com respectivos circuitos de ajuste como forma de envio das grandezas de corrente e tensão para o medidor de energia;
- Medidor de energia: será do tipo circuito integrado, que irá receber os sinais de corrente e tensão por meio de transdutores e realizará a medição das grandezas referidas;
- Microcontrolador: irá controlar e coordenar todo o hardware envolvido, implementará as funcionalidades de cálculo de consumo, detecção de falhas e comunicação;
- Alimentação do sistema: será um transformador de potencial que alimentará todos os elementos de hardware a partir da rede elétrica;

- Modem GSM/GPRS e Placa Wi-Fi 802.11b: serão os meios de comunicação entre o sistema concentrador e o sistema de medição, enviando e recebendo todos os dados necessários;
- Interface Homem-Máquina: será composto de uma tela com o objetivo de consultar as grandezas de tensão, corrente e consumo em tempo real.

A figura 3-2 exibe o diagrama de blocos do sistema de medição, baseado na arquitetura descrita:

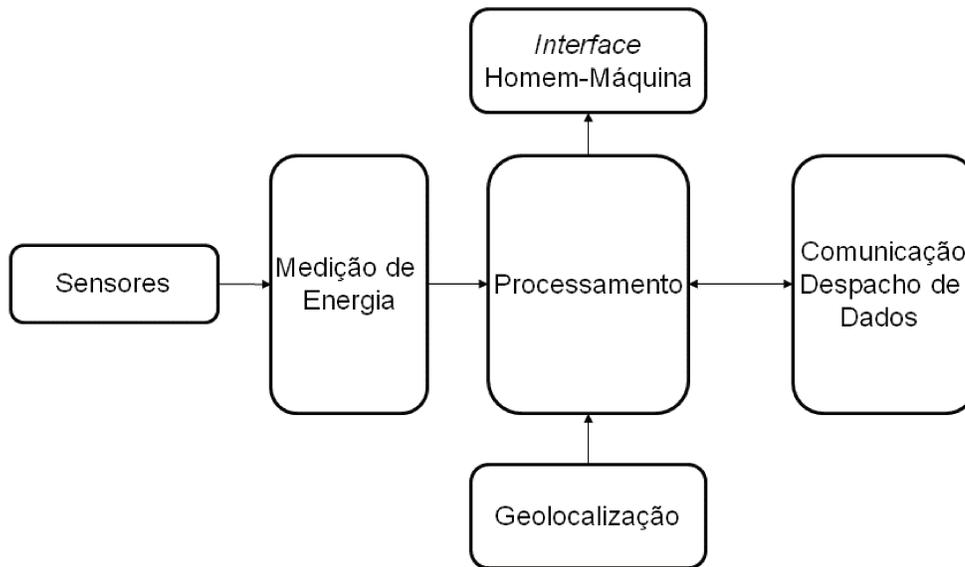


Figura 3-2: Diagrama de blocos do sistema a ser desenvolvido. Fonte: Autor

Em uma situação hipotética, cada um dos sistemas de medição descritos acima poderia ser considerado um nó em uma rede de sensores, onde cada nó iria conectar-se ao sistema concentrador, que por sua vez poderia consolidar as informações de consumo de uma determinada região geográfica, bairro, cidade, estado ou país.

3.2. Protocolos de Comunicação

O sistema de comunicação, de forma independente de meio de conexão, utilizará os protocolos de comunicação TCP/IP ou GSM/GPRS, e devido a esse fato, os protocolos citados serão explandados de forma breve na próxima seção.

3.2.1. Protocolos de Comunicação TCP/IP

A arquitetura de protocolos TCP/IP, que foi criada na década de 70 pelo DoD (Department of Defense, Departamento de Defesa dos Estados Unidos da América), é o alicerce da Internet e essa mesma arquitetura utilizada para atender os requisitos da rede no passado se mantém para atender a rede atualmente [47].

Pelo fato dessa arquitetura ser padrão na Internet, as diversas redes que a compõe também utilizam o TCP/IP como protocolos de sua infraestrutura básica de comunicação, e por isso todas as aplicações de rede executadas no contexto Internet utilizam protocolos dessa arquitetura para viabilizarem a comunicação entre transmissor e receptor de qualquer natureza.

Os termos TCP e IP referem-se ao protocolo TCP (*Transmission Control Protocol*) e protocolo IP (*Internet Protocol*), contudo, essa arquitetura possui um grande número de outros protocolos, que visam atender os diversos objetivos. Como forma de manter a tecnologia e o legado estrutural, desde a criação da arquitetura TCP e IP, ocorrem ajustes e adaptações no modelo e nos requisitos funcionais resultantes da evolução dos serviços de Internet. Em termos de transporte das informações pela rede, existem dois protocolos em sua camada de transporte: o protocolo TCP (*Transmission Control Protocol*) e o protocolo UDP (*User Datagram Protocol*) [48].

O TCP é o principal protocolo de transporte utilizado pelas aplicações disponíveis na rede (tais como navegação web, correio eletrônico e transferência de arquivos, dentre outras) onde uma de suas principais características é a confiabilidade em suas transmissões (fornecida a partir de seu direcionamento à conexão, com confirmações de recebimento de mensagens e retransmissão de eventuais conteúdos perdidos), todavia, possui alto custo de processamento devido a confiabilidade e controles que tornam essa característica possível [48].

O UDP é um protocolo simples e não orientado à conexão (não possui confirmação de recebimento de mensagens e nem retransmissão de eventuais conteúdos perdidos), mas é leve e rápido, adequado para aplicações que exigem velocidade e que são tolerantes a eventuais perdas de informações.

3.2.2. GSM/GPRS

O GSM (*Global System for Mobile Communications* ou Sistema Global para Comunicações Móveis) é um dos padrões existentes de comunicação para telefones celulares e atualmente consolidou-se como o padrão mais usado [49] no mundo. O sistema GSM diferencia-se de seus antecessores, pois o sinal e os canais de voz são digitais, que em sua versão inicial ficou conhecida como tecnologia 2G. Basicamente a transmissão de dados se dava através da comutação de circuitos, onde uma conexão entre dois aparelhos era estabelecida, e na sequência a comunicação era feita de forma ininterrupta. Com o aumento da abrangência e uso da Internet, os usuários de telefones móveis passaram a demandar acesso à internet através do celular. O problema é que a segunda geração de celulares preparou-se para oferecer telefonia digital, mas não para acessar a Internet.

Como visto na seção anterior, a Internet transporta dados por pacotes, através do protocolo IP e para que a rede móvel se adequasse à Internet, era preciso que os dados fossem organizados e transportados também em pacotes. Foi criada então a tecnologia GPRS (*General Packet Radio Services* ou Serviços Gerais de Pacotes por Rádio), onde permite-se o tráfego de dados por pacotes, de forma a integrar à Internet e a rede de telefonia celular. O sistema GSM com o GPRS integrado ficou conhecido como geração 2.5G, consolidando a evolução e convergência de redes de comunicação de dados móvel [49].

Em termos de taxa de transferência de dados, teoricamente a velocidade de transferência de dados do GRPS pode chegar a 171,2 Kb/s (kilobits por segundo), mas normalmente não ultrapassa 80 Kb/s. Isso se deve a vários fatores como a quantidade de slots em uso, pois cada um possui determinada velocidade, baseado no esquema de codificação de canal. Por exemplo, se for utilizado o esquema CS-1, cada slot transmite até 9,05 Kb/s; se for utilizado CS-2, o limite é de 13,4 Kb/s; no caso de CS-3, a taxa máxima é de 15,6 Kb/s; por fim, o slot chega a 21,4 Kb/s com CS-4 [50].

4. DESENVOLVIMENTO E IMPLEMENTAÇÃO

Como forma de desenvolvimento e implementação da arquitetura proposta na seção anterior, foram testados isoladamente cada um dos componentes para garantir que suas características e obter resultados satisfatórios quanto a capacidade, precisão e integridade, bem como comprovar a capacidade de atender os objetivos determinados.

Dessa forma, descreve-se nessa seção os materiais selecionados, de acordo com a arquitetura proposta e o método empregado para fases de desenvolvimento, teste, validação do protótipo, bem como sua implementação. Os testes planejados:

1. Linearidade do transformador de corrente;
2. Teste medidor comercial baseado no ADE7753;
3. Teste Protótipo baseado no ADE7753;
4. Teste do software
5. Teste das placas de comunicação Wi-Fi e GSM/GPRS

4.1. MATERIAIS

Para prova de conceito, foi necessário definir os materiais para as fases de desenvolvimento e testes do transformador de corrente, circuito integrado, microcontrolador, placa de comunicação Wi-Fi, GPRS/GSM e placa de comunicação GPS. Além disso, foi necessário definir o ambiente integrado de desenvolvimento de software, bem com a seleção das bibliotecas que suportam cada placa de comunicação.

Primeiramente foram identificados os materiais e respectivos fabricantes, de acordo com a revisão bibliográfica, fundamentos teóricos e arquitetura proposta. Baseado nessa identificação, os seguinte materiais foram escolhidos:

- Plataforma de desenvolvimento Arduino Uno R3, com processador ATMEGA328P;
- Fonte de alimentação CA 127V/9V (para alimentação do microcontrolador);

- Transformador de corrente Yhdc SCT-013-030, 30A, tipo núcleo dividido, não invasivo;
- Transformador de tensão 127V para 12V, 1A (para medição da tensão da rede);
- Circuito Integrado de medição de energia ADE7753 (fabricante Analog Devices);
- Placa de comunicação GSM/GPRS Shield;
- Placa de comunicação Wi-Fi Shield;
- Placa GPS Shield;
- Mostrador LCD JHD 162A;
- Resistores e capacitores diversos (serão detalhados na seção Apêndice);
- Placa de protipagem;
- Plataforma Xively;
- Ambiente Integrado de desenvolvimento Arduino;

Para efeitos de desenvolvimento, testes e validação do protótipo, utilizaram-se os seguintes instrumentos de medição:

- Osciloscópio Tektronix TDS 1001C-EDU (40MHz 500MS/s);
- Multímetro Fluke 179 True RMS, com precisão de $\pm 0,09\%+2$ e resolução máxima 0,1 mV;
- Multímetro de bancada Fluke 8808A, com resolução de 5,5 dígitos;
- Multímetro Minipa ET-1100 DMM;
- Alicates amperímetro YF-8020;
- Regulador de tensão variac 220V, 4A;
- 6 lâmpadas 100W (127V);
- Medidor comercial baseado no ADE7753 Energy Shield Olimex.

4.1.1. Microcontrolador

Este é o elemento coordenador do sistema de medição de energia, e será responsável pelo controle de todos os dispositivos utilizados no sistema de medição de energia, bem como efetuar a comunicação com o medidor de energia. A coordenação e integração com as redes de comunicação também será coordenada pelo microcontrolador.

Existem vários fatores a serem considerados no processo de decisão e escolha do microcontrolador a ser utilizado, como facilidade de uso, documentação disponível, ambiente e ferramentas de desenvolvimento, linguagem utilizada, preço e características como memória, velocidade, número de portas e resolução do conversor analógico-digital.

Assim, dentro das opções disponíveis AVR, fabricante ATMEL, PIC, fabricante MicroChip; ARM, fabricantes Philips, ST e outros e a família MSP430, fabricante Texas, foi escolhida para a implementação deste protótipo a plataforma de desenvolvimento Arduino [26], que consiste numa placa de desenvolvimento aberta, onde existem vários modelos disponíveis. O modelo Arduino Uno R3 foi selecionado e o mesmo é baseado no microcontrolador atmega328P e uma interface serial através da porta USB.

A razão que motivou a seleção foi a proposta de plataforma aberta, sendo que a mesma possui os componentes mínimos para o funcionamento do microcontrolador, além de fácil integração de componentes e grande documentação e bibliotecas de suporte à sensores e dispositivos variados.

Reforça-se que a plataforma terá sua aplicação focada no desenvolvimento e prototipação, devido ao fato de uma instalação em ambiente produtivo ou implementação em larga escala deve-se considerar o projeto e construção de um dispositivo compacto que possui apenas elementos mínimos requeridos para funcionamento, além dos circuitos de suporte ao microcontrolador.

4.1.2. Base de construção do protótipo e Circuito Integrado de medição ADE7753

A medição das grandezas de corrente e tensão será realizada através de métodos completamente eletrônicos. Assim, a medição da energia consumida será da responsabilidade de uma rotina de software que irá fazer o cálculo teórico dessa grandeza.

Para a realização desta tarefa optou-se pela utilização do circuito integrado ADE7753 [51], que pode ser visto na figura 4-1, pois na revisão bibliográfica e verificação de aparelhos

comerciais da mesma família de circuitos integrados, observou-se resultados bastante satisfatórios no que diz respeito às medições desejadas [51] e um conjunto de características que o tornam a escolha ideal para a implementação deste sistema.



Figura 4-1: Circuito Integrado ADE7753. Fonte [51]

O ADE7753 trata-se de um circuito integrado para medição de energia com uma elevada precisão (menos de 0,1% de erro na medição da energia ativa). Este circuito permite efetuar calibrações de ganho, offset, fase e valor eficaz utilizando comunicação série SPI (Serial Peripheral Interface Bus) e possui ainda uma saída em onda quadrada com frequência programável e variável com o valor da potência a ser medida.

Este circuito integrado incorpora 2 ADC's Σ - Δ (sigma-delta) de segunda ordem com uma resolução de 16 bits, um integrador digital no ADC de corrente e todo o processamento de sinal necessário para o cálculo da energia, como é o caso da medição do período e valores eficazes dos sinais de tensão e corrente.

Também possui dois pares de entradas diferenciais de tensão V1 e V2, para aquisição dos sinais de corrente e tensão, respectivamente, onde cada um destes pares de entradas diferenciais está limitado a sinais que assumam no máximo 0,5V e no mínimo -0,5V.

Cada entrada analógica possui um amplificador de ganho programável (PGA) que pode assumir os valores 1, 2, 4, 8 e 16, onde a seleção de ganho é feita por meio da escrita num registro interno do circuito integrado e também é possível ajustar o erro de offset em cada canal, na faixa de gama de $\pm 20\text{mV}$ a $\pm 50\text{mV}$, que pode variar, baseado no ganho selecionado.

Para a conversão de sinais analógicos para digital, o ADE7753 possui dois ADC's Σ - Δ de segunda ordem. Por questões de simplicidade na figura 4-2 é apresentado o diagrama de blocos de um ADC Σ - Δ de primeira ordem:

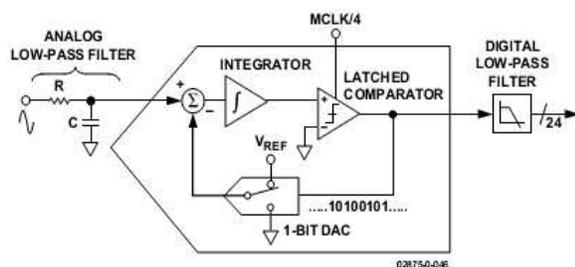


Figura 4-2: Diagrama de blocos de um ADC Σ - Δ . Fonte [51]

A comunicação com o ADE7753 é feita através do protocolo SPI (*Serial Peripheral Interface Bus*). O SPI consiste num barramento de comunicação série síncrona que permite a troca de dados em modo full-duplex, isto é, os dados podem ser enviados e recebidos simultaneamente. Assim, a comunicação através de SPI requer a utilização de 4 conexões:

- Clock – Sinal de relógio gerado pelo mestre;
- MOSI – Dados enviados pelo mestre;
- MISO – Dados recebidos pelo mestre;
- CS (Chip Select) – Linha que selecciona o escravo com o qual se irá dar a comunicação.

Os dispositivos comunicam-se no modelo mestre-escravo, onde a comunicação é sempre iniciada pelo mestre (o barramento SPI apenas pode operar com um único mestre), sendo que a existência de múltiplos escravos é suportada pelo protocolo, porém cada um deverá possuir Chip Select diferente.

O protótipo teve sua arquitetura baseada nas notas de aplicação AN-564 [52], AN-758 [53] e o próprio datasheet do circuito integrado ADE7753 [51], todas da Analog Devices. Utilizou-se o diagrama de blocos, que pode ser visto na figura 4-3, onde algumas adaptações foram feitas, visto que o documento propõe o uso do microcontrolador PIC 16C62B, circuito integrado de medição ADE7756, entre outros fatores que podem ser consultados no documento [52]:

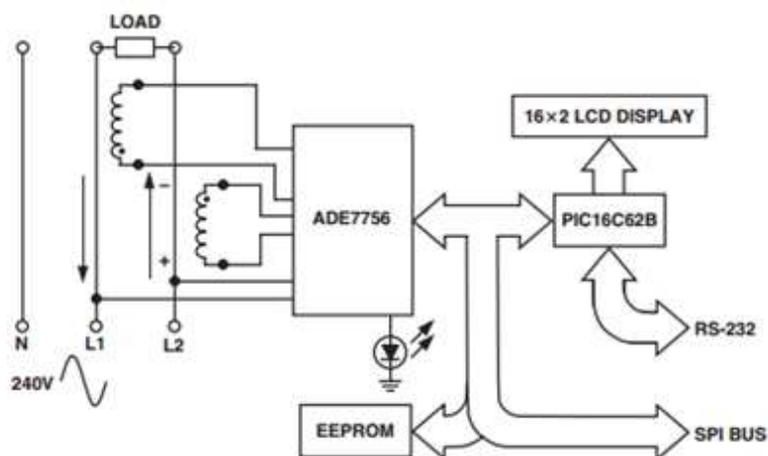


Figura 4-3: Diagrama de blocos de referência. Fonte [52]

O circuito de teste proposto pelo fabricante Analog Devices em [51] também foi utilizado como fundamento para o desenvolvimento e implementação do diagrama esquemático e o mesmo pode ser visto na figura 4-4:

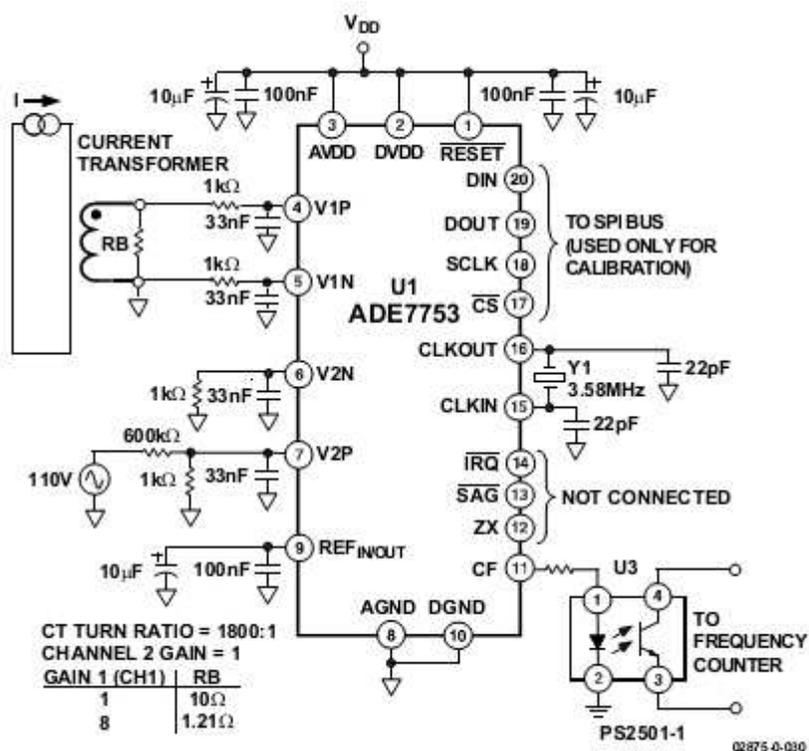


Figura 4-4: Diagrama de teste proposto para o Circuito Integrado ADE7753. Fonte [51]

4.1.3. Interface com a rede elétrica

Associado ao processo de medição da energia está também associada a necessidade de implementar dois circuitos distintos: um para condicionamento do sinal de tensão e outro para condicionamento de sinal de corrente.

O circuito integrado ADE7753 não pode receber diretamente os sinais de tensão e corrente enviados pelos elementos sensores devido à incompatibilidade dos níveis recebidos, assim o protótipo irá utilizar circuitos e sensores que irão tratar as informações recebidas na forma analógica, condicionar os sinais para níveis de tensão adequados e convertê-los para a forma digital no circuito integrado e microcontrolador ATMEGA.

No que diz respeito ao circuito de condicionamento de tensão, utilizou-se um transformador com uma relação de transformação de 127:12 V, com o objetivo de, por um lado garantir o isolamento galvânico e por outro reduzir o valor da tensão para um valor relativamente baixo. Após esta conversão dos valores utilizou-se um divisor resistivo para colocar os valores da tensão entre os limites impostos e no que diz respeito à forma de onda da corrente utilizou-se um transformador de corrente.

4.1.4. Sensor de tensão e circuito divisor de tensão

Para tratar o sinal de tensão recebido da rede elétrica, o objetivo principal do condicionamento desse sinal é transformá-lo para que sejam atendidas as características das entradas analógicas do circuito integrado ADE7753: apenas admitir valores nas suas entradas na gama de -0.5V a 0.5V.

A solução escolhida foi a utilização de um transformador de potencial como forma de reduzir a tensão proveniente da rede. O circuito de condicionamento de sinal deve converter a saída do transformador de potência de forma que a onda tenha um pico positivo menor que 5V e um pico negativo maior que 0V e portanto é preciso reduzir a tensão enviada pelo transformador de tensão e posteriormente adicionar uma compensação de modo que não exista componente negativo no sinal.

O sinal pode ser reduzido por meio de um circuito divisor de tensão que receberá o sinal através de um transformador de tensão, que será posteriormente conectado no canal V2P+ do

circuito integrado ADE7753, dentro do nível de tensão esperado. A figura 4-5 mostra o diagrama do circuito divisor de tensão, proposto pelo fabricante e de acordo com o datasheet do CI:

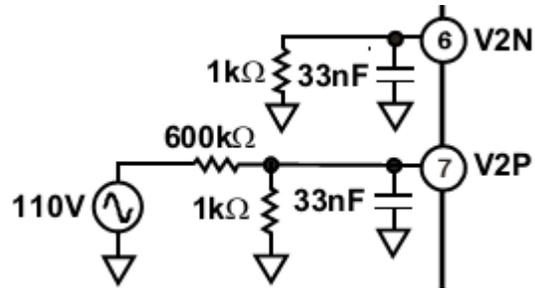


Figura 4-5: Diagrama do circuito divisor de tensão. Fonte: adaptado de [51]

4.1.5. Sensor de corrente e acoplamento resistivo

O transformador de corrente SCT-013-030 [54] da empresa Beijing YaoHuadechang Electronic Co.,Ltd foi selecionado como parte do sensor de corrente pelo fato de apresentar as características de medição de correntes até 30A, meio de acesso não invasivo (tipo núcleo dividido) e baixo custo, adequadas à arquitetura do sistema. Da mesma forma que o sensor de tensão, o sensor de corrente deve ajustar o respectivo nível de sinal esperado pelas entradas do circuito integrado ADE7753. O transformador de corrente escolhido pode ser visto na figura 4-6:



Figura 4-6: Transformador de Corrente 30A. Fonte [54]

Uma vez que o transformador de corrente é capaz de obter o sinal de corrente, é necessário condicionar o sinal de saída através de um acoplamento resistivo, que irá converter o sinal na forma esperada pelo circuito integrado ADE7753.

O princípio de funcionamento consiste na associação de resistores em série aplicado ao circuito na qual se queira medir, além de capacitores para atuarem como filtros. A figura 4-7

mostra o diagrama do circuito de acoplamento resistivo sugerido para conexão com o circuito integrado ADE7753:

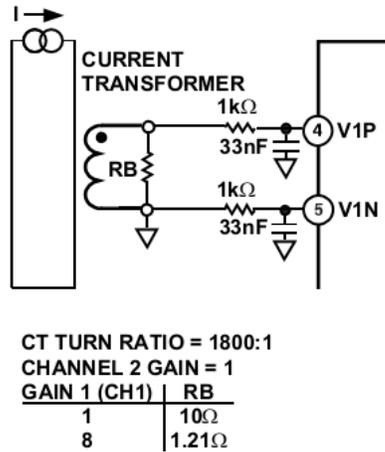


Figura 4-7: Diagrama de acoplamento resistivo. Fonte: adaptado de [51]

4.1.6. Placa de comunicação GSM/GPRS Shield

Através da rede GSM serão trocadas todas as mensagens necessárias entre o protótipo e a camada de apresentação e a plataforma concentradora de dados. Assim, para a implementação desta troca de mensagens será necessário um modem GSM no medidor de energia onde foi escolhida a placa Shield Cellular com módulo celular SM5100B [55] da empresa Sparkfun. Essa placa possui as funcionalidades de SMS, comunicação GSM/GPRS e TCP/IP, que que permite uma fácil interligação com a microcontrolador. A placa pode ser vista na figura 4-8, abaixo:



Figura 4-8: Placa Shield Cellular com módulo SM5100B. Fonte [55]

4.1.7. Placa de comunicação Wi-Fi

A placa de comunicação para redes Wi-Fi escolhida foi a WiFly Shield [56], do fabricante Sparkfun, que permite conectar a placa Arduino à uma rede wireless 802.11b/g através do módulo RN-131C da Roving Network com um chip SPI-to-UART SC16IS750.

A ponte SPI-to-UART é usada para permitir uma transmissão mais rápida, de forma a liberar a UART do Arduino. Na configuração mais simples, o hardware requer apenas quatro conexões (PWR, TX, RX e GND) para criar uma conexão de dados sem fio, ou uma conexão SPI através dos pinos digitais 10 a 13 (CS, MOSI, MISO, SCLK respectivamente) no microprocessador ATMEGA. A figura 4-9 ilustra a placa utilizada:



Figura 4-9: Placa WiFly Wi-Fi Shield. Fonte [56]

4.1.8. Placa módulo GPS

Para a implementação da funcionalidade de geolocalização foi escolhida a placa GPS Shield [57] da empresa Sparkfun. Essa placa possui o módulo GPS UP501 da Fastrax e tem dimensões reduzidas, possui faixa de alimentação de 3V a 4,2V com baixo consumo (75mW funcionando a 3V) e uma linha serial de comunicação. A placa pode ser vista na figura 4-10:



Figura 4-10: Placa GPS Shield. Fonte [57]

4.1.9. Ambiente de desenvolvimento integrado Arduino

De acordo com [58], Arduino é uma plataforma aberta (Open Source) de prototipagem de dispositivos eletrônicos. A plataforma consiste de um ambiente de desenvolvimento, bibliotecas e placas de desenvolvimento, utilizando o compilador AVR-GCC (C e C++) e o utilitário ISP AVRDUDE, sendo baseada principalmente na família de microcontroladores ATmega da Atmel, além de suas bibliotecas facilitarem a utilização das capacidades do microcontrolador (USART, ADC, PWM). O ambiente de desenvolvimento integrado apresenta algumas limitações, como a falta de suporte para depuradores, ausência de simuladores, contudo é funcional e possui um console para saída serial, permitindo testes rápidos e diretos do código em questão.

Apesar de utilizar seu próprio ambiente de desenvolvimento, as placas e as bibliotecas podem ser utilizadas com outros ambientes de desenvolvimento como o Atmel AVR Studio, Visual Studio (Microsoft) ou Eclipse IDE (da fundação Eclipse). Na figura 4-11, pode-se observar a tela principal do ambiente de desenvolvimento integrado Arduino:

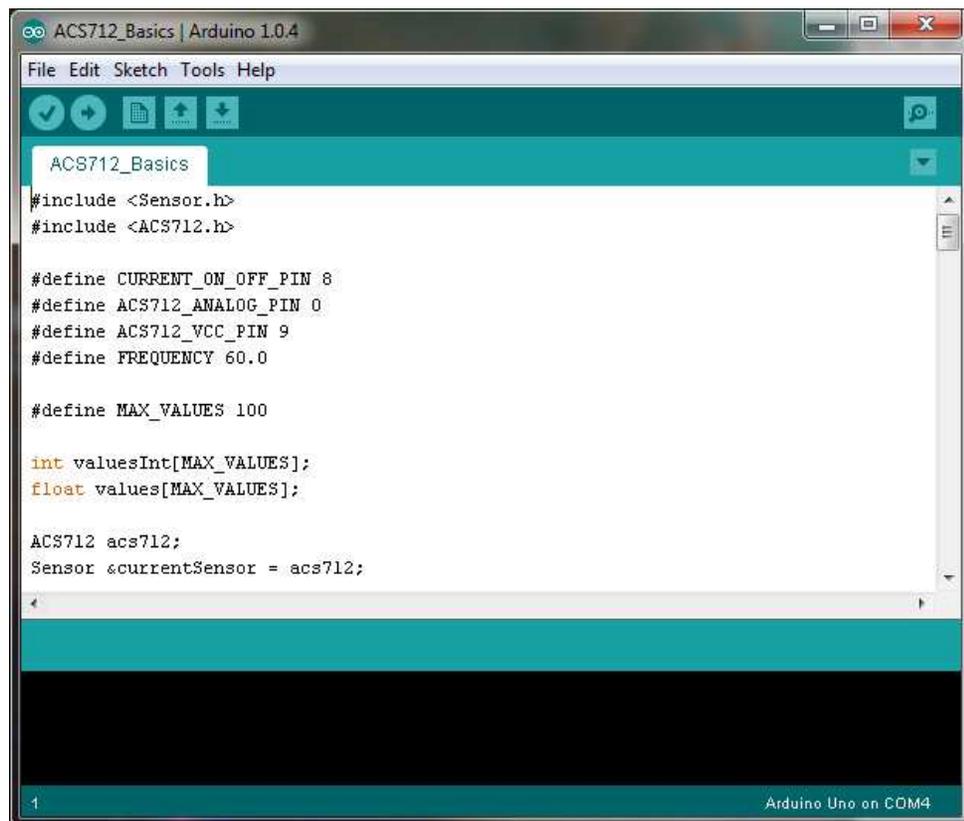


Figura 4-11: Ambiente de desenvolvimento integrado Arduino. Fonte: Captura de tela pelo Autor

4.1.10. Camada de aplicação

Como prova de conceito, será utilizado um serviço de Internet das Coisas [46] chamado Xively [59], (conhecido anteriormente como Pachube e Cosm), como concentrador das informações de saída. O Xively é composto de uma plataforma aberta, uma API e uma comunidade que possibilita que dispositivos possam ser conectados à Internet de forma rápida e transparente, através de tecnologias de programação convencionais. É necessário configurar um usuário e senha, bem como uma área de trabalho para que seja possível enviar dados para a API plataforma. Na arquitetura proposta, as placas de comunicação irão submeter os pacotes de dados através de requisições do protocolo HTTP, diretamente para a API da plataforma. Na figura 4-12, podemos ver um exemplo de saída de dados e gráficos:

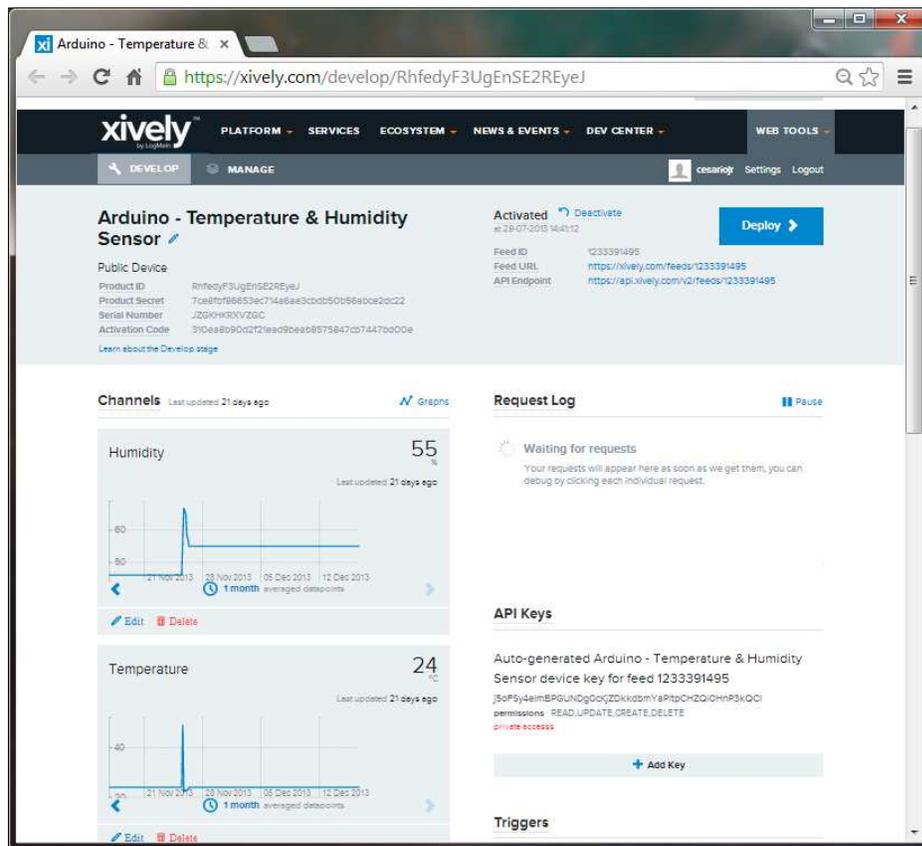


Figura 4-12: Página principal de controle do serviço Xively. Fonte: Captura de tela pelo Autor

O serviço Xively irá representar o concentrador virtual de todos os possíveis medidores existentes e irá receber as grandezas obtidas dos medidores em teste.

4.2. MÉTODO

Baseado na arquitetura vista na seção 3 e nos materiais vistos na seção 4.1, torna-se necessário definir os elementos a serem testados, o plano de testes e os resultados esperados. Dessa forma, os seguintes elementos foram testados: transformador de corrente, CI ADE7753, Placas de comunicação Wi-Fi shield, GSM/GPRS shield e GPS. Como destaque, será efetuado um protótipo para conter o CI ADE7753, baseado no datasheet [51] e notas de aplicação AN-545 [52] ambos da Analog Devices.

Após a montagem do protótipo em uma placa de prototipagem, foi montada uma placa de circuito impresso, conectada com o microcontrolador ATMEGA328P (na plataforma Arduino) e as respectivas placas de comunicação. Em relação aos planos de teste, definiu-se a metodologia de testes, composta de testes unitários e testes de integração dos componentes selecionados.

Para os elementos sensores (transformador de corrente e circuito integrado ADE7753), foram feitas validações dos resultados obtidos contra aparelhos de medição de alta precisão, de forma a calcular a porcentagem de erro entre os valores esperados, calculados e medidos. Como validação das grandezas obtidas de tensão e corrente, foi utilizado o módulo comercial Energy Shield que implementa o circuito integrado ADE7753 para efetuar comparações com o protótipo construído, sendo que todos os valores das cargas definidas foram tomados durante 20 minutos em cada teste.

Reforça-se que todos os aparelhos de medição utilizados como referência possuem resolução superior ao protótipo, ou seja: o protótipo efetua medições de tensão e corrente com duas unidades decimais, ao passo que os aparelhos de referência possuem resolução mínima de três casas decimais.

4.2.1. Casos de teste e metodologia empregada

Como forma de estabelecer uma metodologia de testes padronizada, foi criada um caso de teste composto de seis lâmpadas incandescentes de 127V e 100W, que por sua vez pode ser alimentada diretamente através da rede 127V ou pode ser alimentada por um variador de tensão (Variac), conectado na mesma rede 127V. Ao conectar a carga diretamente na rede, gera-se o consumo máximo de corrente (calculada em 4,74A) de modo a efetuar testes, onde também existe a possibilidade de testar a carga a partir de 1 lâmpada até 6 lâmpadas.

Ao conectar a carga ao variador de tensão, pode-se fornecer tensões incrementais de 0V até 127V e limite de 4A (limite do equipamento) de acordo com o teste desejado. Foi conectado a saída do variador de tensão um multímetro no modo Voltímetro em paralelo com a carga para garantir a acurácia da tensão selecionada nos testes, bem como do valor dos incrementos de tensão selecionados.

Também foi conectado um alicate amperímetro em uma das fases e um segundo multímetro no modo Amperímetro em série com a carga para garantir a acurácia da corrente resultante nos testes, que também foi utilizada como parâmetro de comparação.

Um ponto importante é que apesar do transformador de corrente possuir o limite teórico de medição de 30A, os testes foram efetuados até o limite de 4A, de acordo com os equipamentos disponíveis. trabalhos futuros podem elevar o patamar de medição de corrente.

4.2.2. Teste do Transformador de Corrente

O transformador de corrente deve apresentar uma saída com linearidade adequada de forma a evitar erros no processo de medição. Como meio para testar a linearidade do transformador de corrente SCT-013-30, foi seguida a metodologia descrita na seção 4.2.1.

Foi utilizado o multímetro Minipa ET-1100 DMM (precisão de três dígitos e meio) no formato Voltímetro em paralelo ao variador de tensão (Variac) para validar as medidas de tensão além do multímetro Fluke 179 True RMS (precisão de quatro dígitos) no formato amperímetro em série com a carga de lâmpadas para medir e validar a corrente consumida, além do uso do alicate amperímetro YF-8020 (precisão de três dígitos), conectado em uma fase da carga de lâmpadas, para medir e validar a corrente consumida e compará-la com os valores obtidos do multímetro Fluke 179 True RMS Multimeter.

Finalmente, a conexão de saída do transformador de corrente SCT-013-30 foi conectada em um canal do Osciloscópio Tektronix TDS 1001C-EDU (precisão de quatro dígitos) para tomada dos valores de tensão de saída. O diagrama esquemático visto na figura 4-13 ilustra o teste:

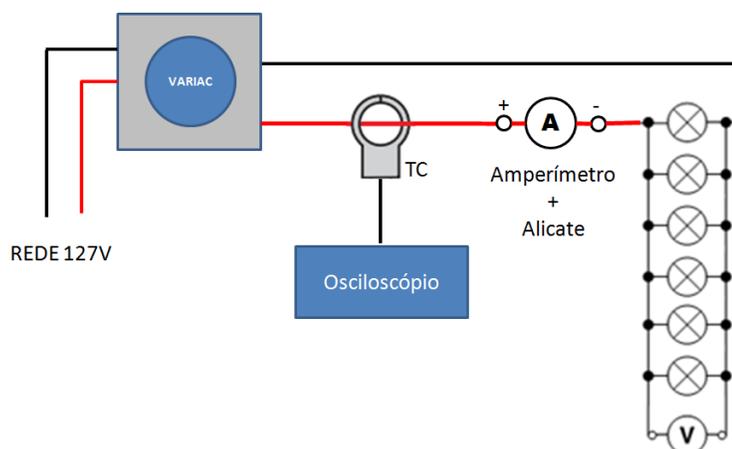


Figura 4-13: Esquemático do circuito de teste do transformador de corrente. Fonte: Autor

Com base no circuito montado, o mesmo foi ligado à rede elétrica com tensão de 127V através do variador de tensão (Variac), onde ajustou-se o mesmo para tensão inicial de 0V e foi-se incrementando a tensão gradativamente em passos de 0,1V, até atingir o limite de corrente determinado pelo variador de tensão, que é de 4A. O resultado esperado é a saída linear da tensão, a partir do transformador de corrente, que irá confirmar que o mesmo é adequado como transdutor e elemento sensor de corrente.

Na figura 4-14 abaixo, pode-se ver a bancada de testes montada de acordo com o diagrama esquemático da figura 4-13:

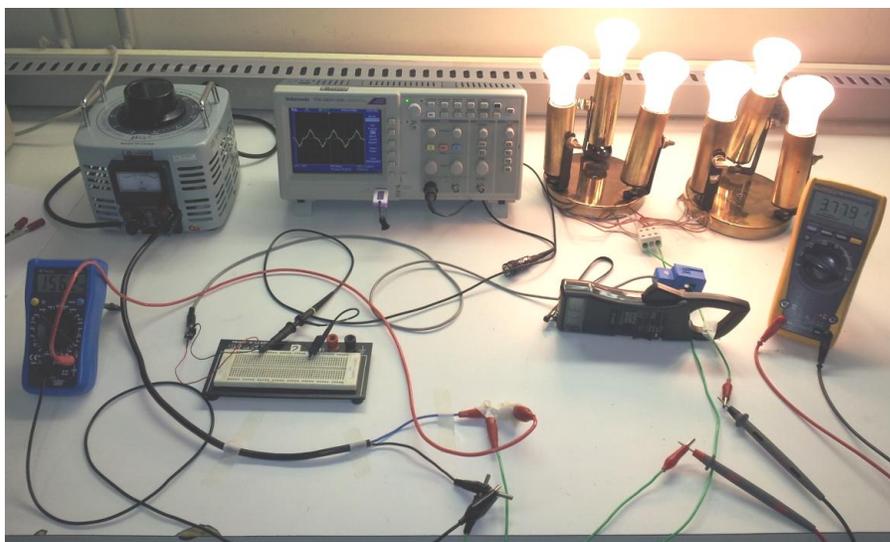


Figura 4-14: Teste do transformador de corrente. Fonte: Autor

4.2.3. Teste do CI ADE7753

Como forma de testar e validar a implementação do CI ADE7753, foi utilizado um medidor comercial baseado no circuito integrado supracitado, chamado Energy Shield [60]. Esse medidor pode ser utilizado na plataforma Arduino e possui várias características que permitem testar e validar o protótipo proposto. As principais características são a medição de tensão e corrente RMS, faixa de operação de tensão entre 0V e 220V e limite de medição de corrente até 30A. O Energy Shield foi utilizado como base de validação e pode ser visto na figura 4-15:



Figura 4-15: Energy Shield com Circuito Integrado ADE7753 [60]

Através do software Eagle Cad, versão educacional, foi elaborado o diagrama esquemático baseado no datasheet do CI ADE7753 [51] para montagem do protótipo, e como discutido anteriormente, foi utilizado como sensor/transdutor o transformador de corrente SCT-013-30 e uma transformador de potencial uma fonte de 12V.

Os componentes utilizados, bem como suas especificações também seguiram a proposta apresentada no datasheet do CI ADE7753 [51]. A figura figura 4-16 mostra o diagrama esquemático principal do protótipo:

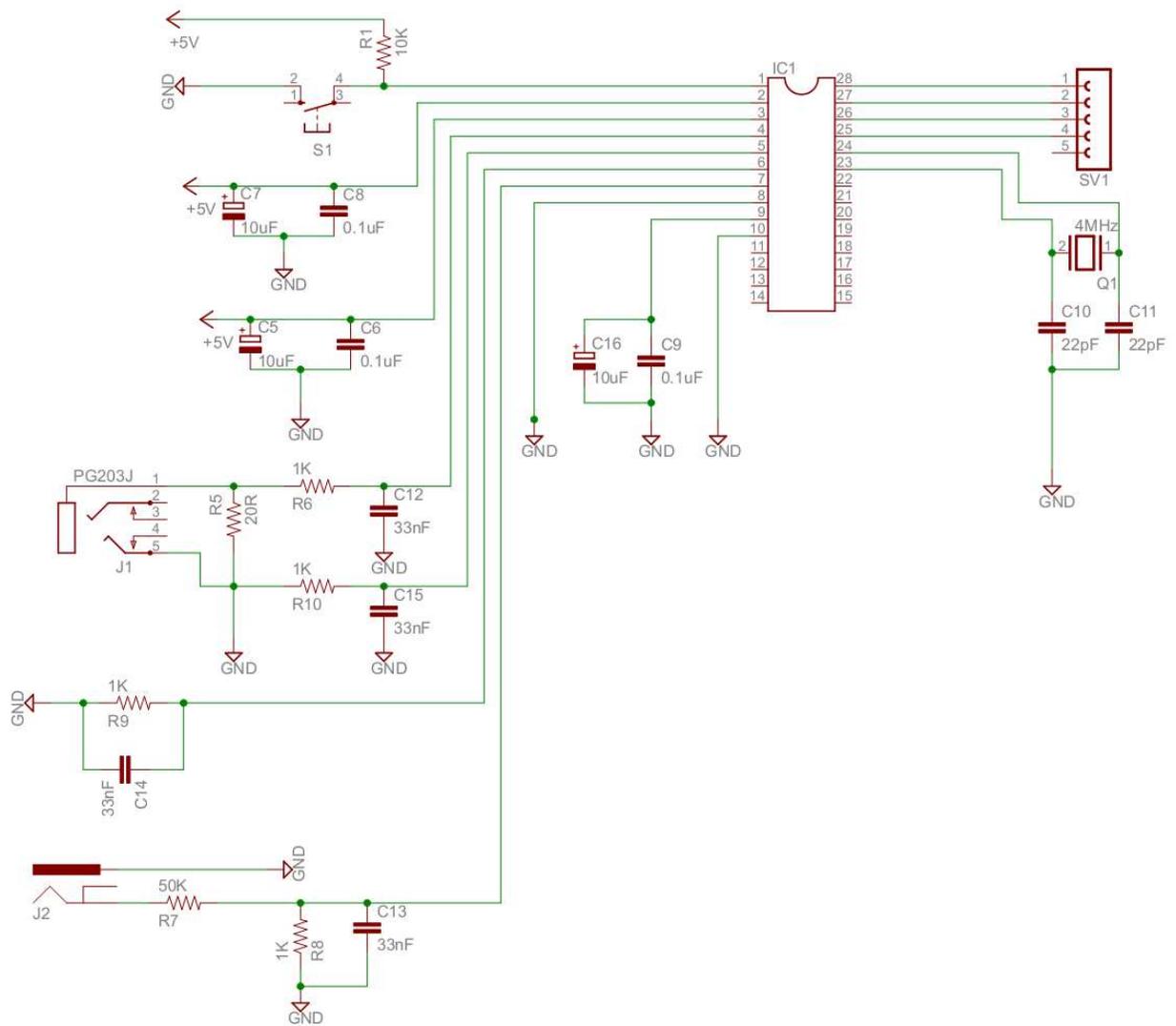


Figura 4-16: Diagrama esquemático do protótipo. Fonte: Autor

O diagrama esquemático da figura 4-16 pode ser visto em detalhes na seção 8.1 e o mesmo foi implementado primeiramente em uma placa de prototipagem para garantir o funcionamento da arquitetura proposta.

Foram conectados um *display* LCD, com o objetivo de exibir os valores de corrente e tensão e o resultado pode ser visto na figura 4-17:

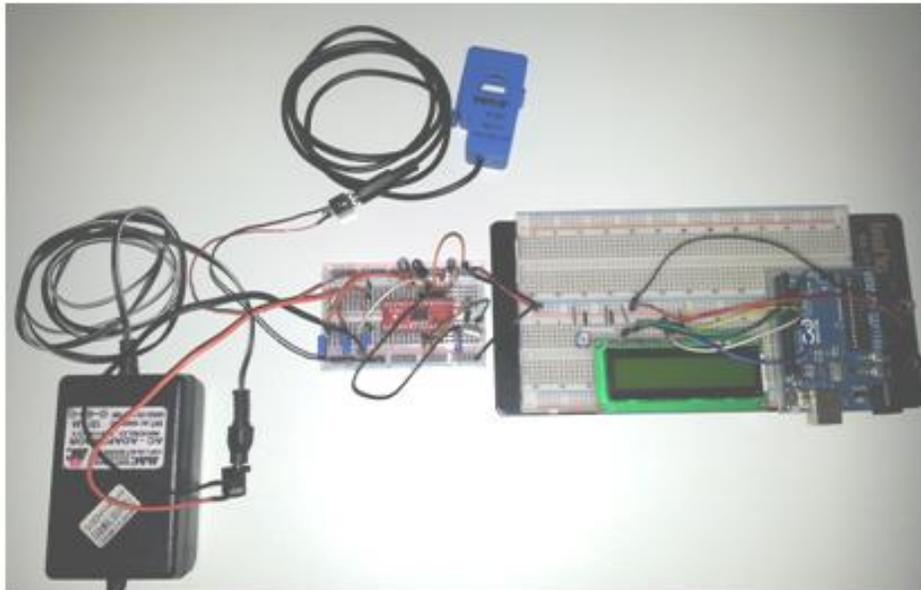


Figura 4-17: Implementação inicial na placa de prototipagem. Fonte: Autor

Baseado no modelo montado na placa de prototipagem, foi confeccionada uma placa de circuito impresso com as mesmas características descritas na presente seção. A figura 4-18 mostra o resultado:

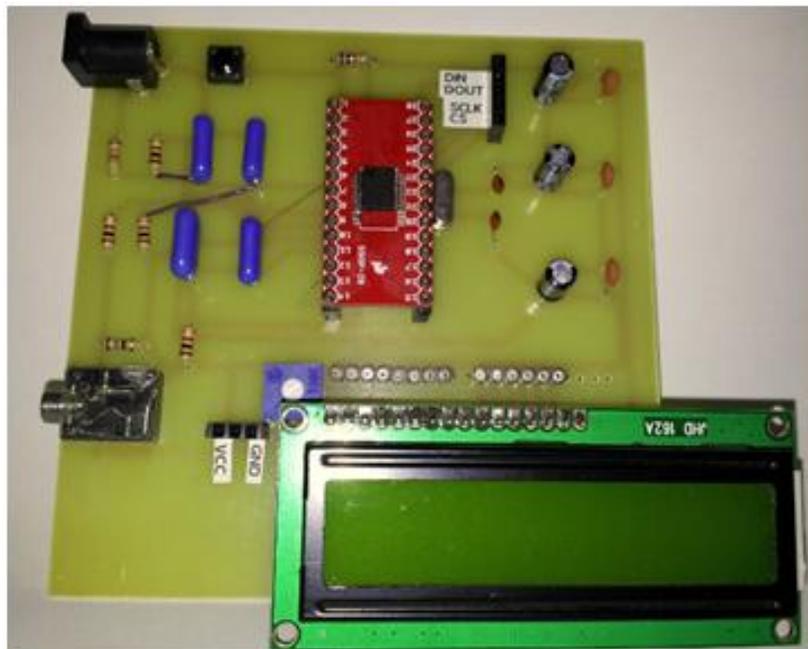


Figura 4-18: Implementação final na placa de circuito impresso. Fonte: Autor

Ambas montagens foram submetidas a dois conjuntos de testes propostos:

1. Testes efetuados contra a carga de uma lâmpada de 100W e 127V, onde o nível de tensão foi ajustado para os valores de 5V, 20V, 40V, 60V, 80V, 100V e 127V;
2. Teste efetuados com uma carga incremental de lâmpadas de 100W e 127V, onde a cada teste, uma lâmpada de 100W, 127V foi adicionada à carga até somar-se 6 lâmpadas.

Os testes propostos garantem a consistência do processo e irão propiciar comparações dentro dos níveis definidos. Como forma de garantir acurácia nos resultados dos testes, foi utilizado adicionalmente o multímetro de bancada Fluke 8808A devido a seu grau de precisão (5,5 dígitos de precisão e acurácia de 0,01%).

4.2.4. Elaboração do software

A camada de software é constituída do firmware, que será gravado no microcontrolador ATMEGA e irá garantir a inicialização de todos os componentes da estrutura geral, bem como a coordenação das grandezas lidas pelo circuito integrado ADE7753, processamento das grandezas e posterior transmissão para o software de exibição.

Para isso, foi utilizada a linguagem Wiring, que é uma variante da linguagem C, utilizada na plataforma de desenvolvimento integrada Arduino. O software será escrito de forma a testar todos os meios de comunicação propostos (Wi-Fi, GSM/GPRS e GPS) e garantir a compatibilidade de funções, significando que o protocolo utilizado será o HTTP, e o meio físico deve possibilitar essa comunicação, de forma independente do hardware.

Vale lembrar que para o teste da placa Wi-Fi, a mesma será configurada via software para acessar uma rede doméstica padrão conectada a um serviço de banda larga doméstica. Assume-se que a rede sem fio terá configuração de segurança modo WPA/WPA2/PSK, protegida por senha criptografada AES. O roteador testado possui potência de até 24 dBm (250 mW), suficiente para cobrir a comunicação sem fio entre o protótipo e o roteador.

A figura 4-19 exibe o fluxograma simplificado do código-fonte:

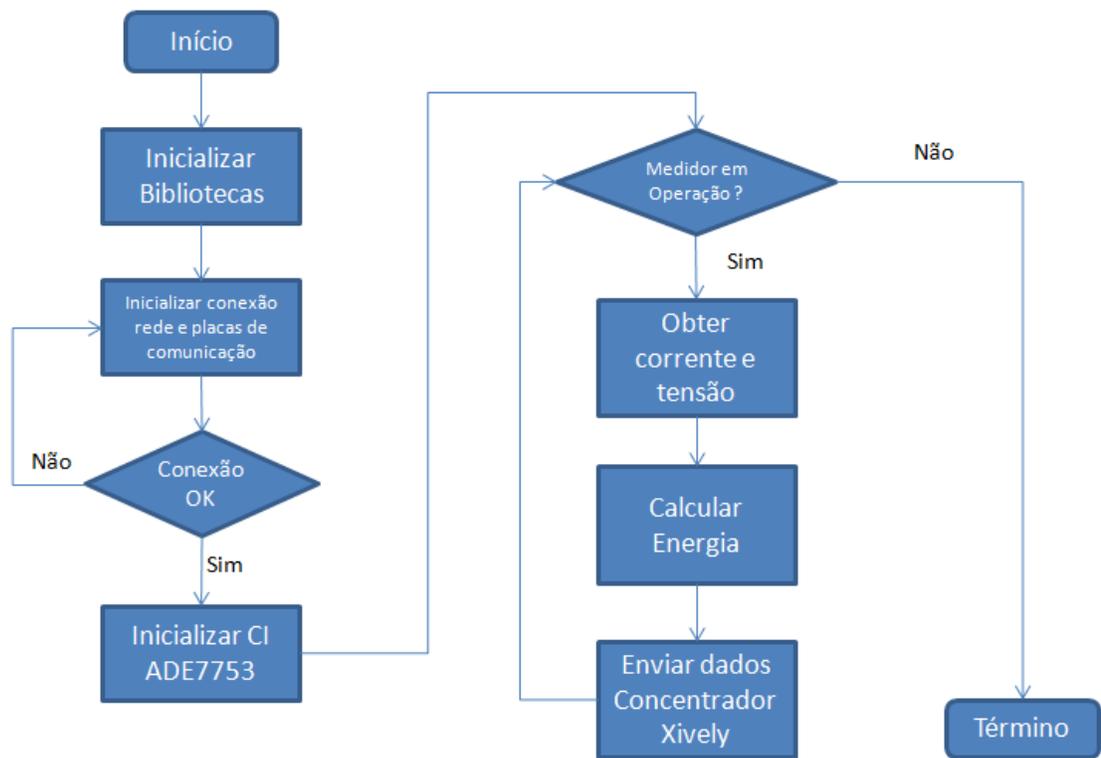


Figura 4-19: Fluxograma. Fonte: Autor

O programa possui códigos para inicializar as bibliotecas para funcionamento do circuito integrado ADE7753, do LCD e das placas de comunicação além de bibliotecas de suporte para o protocolo de comunicação SPI entre o microcontrolador, CI medidor de energia as placas de comunicação. O código-fonte escrito pode ser visto no Anexo 8.5, sendo que o mesmo foi utilizado para conexões Wi-Fi e GSM/GPRS.

Com a medição das grandezas de corrente e tensão, o protótipo irá calcular através de software a energia consumida, sendo que o cálculo de energia acumulada foi codificado de acordo com a descrição da seção 2.2. A informação resultante será despachada através dos meios de comunicação a cada 1 minuto para o serviço Xively e a validação e envio de dados pelos meios de comunicação será feita através de resultados de log gerenciados pelo próprio serviço Xively.

Os dados enviados pelo protocolo HTTP e encapsulados para intercâmbio de dados no formato JSON também podem ser visualizados em detalhes por meio de logs detalhados das requisições. Os valores de tensão e corrente obtidos do protótipo devem ser empacotados no

formato JSON [61], e enviados para o servidor Xively para ser processado. Na figura 4-20, pode-se analisar um exemplo da estrutura de dados que deve ser gerado no padrão JSON e ser enviada via protocolo HTTP:

```
{
  "version": "1.0.0",
  "datastreams": [ {
    "id": "example",
    "current_value": "333"
  },
  {
    "id": "key",
    "current_value": "value"
  },
  {
    "id": "datastream",
    "current_value": "1337"
  }
]
}
```

Figura 4-20: Exemplo de padrão de requisição JSON. Fonte [62]

4.2.5. Teste das placas de comunicação Wi-Fi shield, GSM/GPRS shield e GPS

O teste efetivo das placas de comunicação se dá pela confirmação do recebimento dos dados enviados a partir do microcontrolador ATMEGA pelo serviço Xively, através de logs, como visto na seção anterior. Serão testadas duas soluções de comunicação, utilizando *shields*⁴ da plataforma Arduino, que poderão ser configuradas para o dispositivo:

- Wi-Fi Shield: se a LAN possuir um ponto de acesso sem fio, o dispositivo poderá conectar-se através de usuário, senha e chave de criptografia adequadas, que serão pré-configuradas. É baseada em redes sem fio IEEE 802.11, rede IPv4, com transporte TCP e UDP, ultimamente utilizando o protocolo HTTP para comunicação;
- GPRS Shield: existirá um adaptador/modem GPRS que atuará como contingência, ou alternativa de comunicação caso a LAN não exista ou esteja indisponível. A conexão será feita através do serviço básico de GPRS.

⁴ *Shields* são módulos que podem ser adicionados ao microcontrolador Arduino.

A conexão através de rede GSM irá requerer uma linha de telefonia celular habilitada e um *chip* físico disponível de qualquer operadora de telefonia e será usada em regime de contingência, quando a rede local não estiver disponível. Entre as características do serviço GPRS [40], temos como pontos principais a transferência dos dados em pacotes, interligação direta com redes IP, velocidades maiores (dezenas de Kbit por segundo), tempo de acesso baixo (< 1 segundo) e preço orientado aos dados: a cobrança é feita pela quantidade de pacotes de dados transmitidos e não pelo tempo de conexão com a rede.

Como forma de garantir que os canais de comunicação irão suportar a quantidade de dados a ser transmita, é necessário calcular o tamanho total do pacote que será enviado, dentro da periodicidade de envio do mesmo.

O circuito integrado ADE7753 possui vários registradores, entre os quais utilizaram-se os registradores VRMS e IRMS, que respectivamente tratam as grandezas de tensão e corrente RMS e possuem o tamanho de 24 bits cada, totalizando 3 bytes e para calcular o tamanho total do pacote, precisamos a somar os cabeçalhos camada 2 (dependendo do meio físico escolhido), mais os pacotes IP e UDP. A tabela 4-1 lista o tamanho em bytes dos cabeçalhos destas camadas:

Tabela 4-1: Cabeçalhos TCP/IP e tamanho de pacotes. Fonte: Autor

Cabeçalhos	Tamanho (bytes)
Ethernet camada 2	26
Wi-Fi camada 2	34
IP	20
UDP	8

Para calcular o tamanho total do pacote, deve-se somar o tamanho do cabeçalho do meio escolhido, o tamanho do cabeçalho IP, o tamanho do cabeçalho UDP e o tamanho do pacote de dados enviado. Dessa forma, para o meio de transmissão Ethernet camada 2 por exemplo, o tamanho total do pacote é de 57 bytes (26+20+8+3), visto na equação 6:

$$Total_{ethernet} = Ethernet + IP + UDP \quad (6)$$

Para o meio de transmissão Wi-Fi camada 2, o tamanho total do pacote é de 65 bytes (34+20+8+3), visto na equação 7:

$$Total_{WiFi} = WiFi + IP + UDP \quad (7)$$

Como os pacotes serão enviados uma vez cada minuto, teremos uma banda consumida máxima aproximada de 8,6 bps (65 bytes x 8 bits = 520 bits, dividido por 60 segundos) que é um valor pequeno em relação a capacidade de transmissão das redes em questão e confirma o fato da capacidade das redes atuais Wi-Fi (acima de 54Mbps) suportarem a transmissão proposta.

4.3. Calibrações

O processo de calibração foi realizado no Laboratório de Telecomunicações da Faculdade de Tecnologia (FT), onde se dispunha de uma banco de cargas padrão, que foram utilizados para se estabelecer os valores de corrente e tensão no medidor de energia. Foi efetuada a calibração do de medição de corrente através do CI ADE7753, partindo do menor valor mensurável pelo instrumento de calibração de referência, o multímetros Fluke 179 True RMS, Fluke 8808A e o multímetro ICEL MD-5770.

O processo de calibração seguiu as recomendações de porcentagem de erro do módulo 5 – Sistemas de Medição, e módulo 8 – Qualidade de energia [45]. Inicialmente trabalhou-se na verificação dos valores de tensão e corrente utilizando de cargas padrão e equipamentos de medição com precisão maior que o protótipo e CI ADE7753. Os resultados da medição e os respectivos erros percentuais podem ser vistos na tabela 4-2:

Tabela 4-2: Valores de referência para calibração de valores de corrente. Fonte: Autor

Prototipo (mA)	Fluke 8808A (mA)	Erro %
0,034	0,017	100%
0,037	0,021	76%
0,037	0,024	54%
0,045	0,035	29%
0,056	0,049	14%
0,067	0,062	8%
0,074	0,069	7%
0,089	0,086	3%
0,103	0,101	2%
0,113	0,111	2%
0,128	0,128	0%

Ao revisar o processo de calibração recomendado pelo do fabricante do CI de medição energia [63], viu-se que é possível efetuar a calibração através de registradores, contudo devido ao fato das faixas medidas serem de baixo valor, optou-se por adaptar a curva de erro através do software de forma a ajustar a medição para uma faixa de erro entre 1% e 2%, dentro da faixa proposta para medição de corrente (de 0,1A até 4A).

O processo de medição sofre com fatores externos não eliminados através do circuito, ou até mesmo causados pelo tipo de sensor usado, como é o caso deste protótipo, que utiliza um transformador de corrente, onde se tem uma defasagem devido ao efeito indutivo do transformador, além de interferências externas no processo de medição, que mesmo utilizando os filtros não são possíveis de serem eliminadas devido a interferências do ambiente, quando temos um nível muito baixo de sinal. Fato esse, conectado a sensibilidade do CI medidor na ordem de 1,61mV/LSB, que pode introduzir ruídos na medição de valores extremamente baixos (na ordem de milésimos)

Reforça-se o fato que a medição da potência ativa não foi validada devido ao fato de não existirem equipamentos disponíveis para tal, contudo tal situação não prejudicou o desenvolvimento da proposta.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Descreve-se nessa seção os resultados dos testes, validação do protótipo, bem como sua implementação e discussão dos resultados obtidos. As verificações de resultados seguiram a seguinte ordem: obtenção de valores de carga padrão, ferramentas de medição com classe de precisão maior aos que os medidores convencionais e definição de período mínimo para testes, conforme o planejamento apresentado no capítulo 4.

O processo de verificação se deu através dos valores calculados inicialmente pela metodologia de calibração descrita na seção 4.3 através de testes com valores pré-definidos em uma escala incremental, com o objetivo de verificação de linearidade em toda a faixa de medição.

Para obtenção de resultado das medições, erros e comparativos, foram levantados valores entre o protótipo e o medidor padrão multímetro Fluke 179 True RMS, tomando os valores das cargas definidas durante 20 minutos em cada teste.

5.1. Resultado do teste de linearidade do transformador de corrente

De acordo com o método descrito nas seções 4.2.1 e 4.2.2, observam-se os resultados do teste de linearidade na tabela 5-1, onde foram exibidos apenas cinco valores mais significativos, baseados na leitura da corrente, todavia foram feitas 40 leituras em incrementos de 0,1A:

Tabela 5-1: Resultado do teste de linearidade do transformador de corrente. Fonte: Autor

Voltímetro MinipaET-1100A (V)	Amperímetro Fluke 179 (A)	Saída Osciloscópio (mV)	Alicate YF-8020 (A)
1,10	0,506	18,40	0,48
4,60	1,007	34,90	0,98
25,20	2,005	68,20	1,98
54,70	3,007	102,00	2,99
92,70	4,003	135,00	3,97

Através do software MatLab, foi desenhado o gráfico de linearidade, baseado na corrente de entrada no transformador de corrente e a tensão de saída do mesmo, lida pelo osciloscópio, e pode ser visto na figura 5-1:

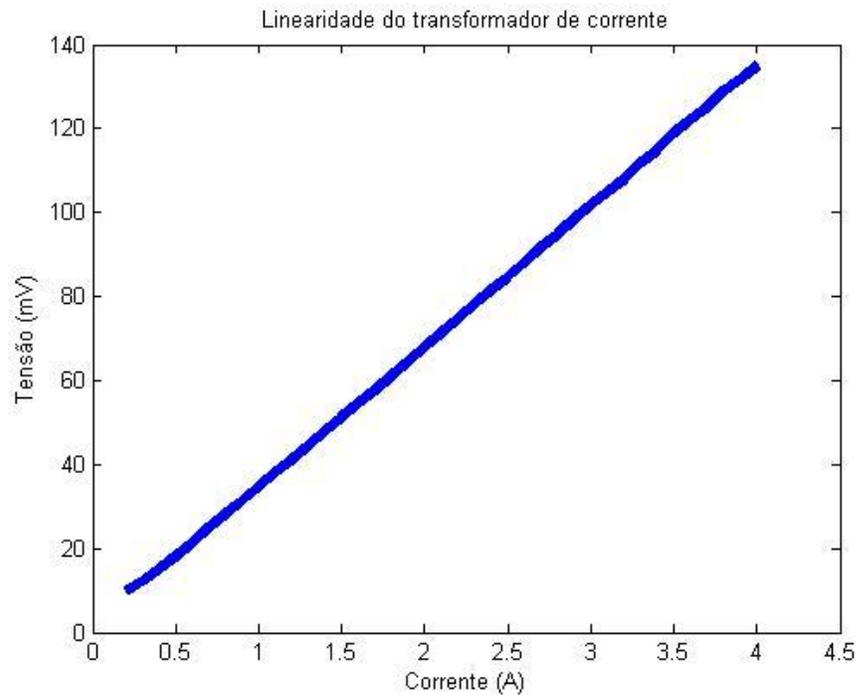


Figura 5-1: Gráfico do Resultado do teste de linearidade do transformador de corrente. Fonte: Autor

De acordo com o resultado das medições e a análise do gráfico, conclui-se que a saída do transformador de corrente é linear e apresenta características adequadas para atuar como sensor/transdutor de corrente, dentro da classe de precisão requerida para o propósito. Calibração de medição de corrente

5.2. Resultado do teste de precisão do Protótipo

De acordo com o método descrito na seções 4.2.2 e 4.2.3, foram efetuados testes contra o protótipo e o medidor comercial, onde foram usados os multímetros Fluke 8808A (referenciado como Amp 01), multímetro ICEL MD-5770 (referenciado como Amp 02) e alicate amperímetro YF-8020 (referenciado como Amp 03).

Observam-se os resultados do teste com o protótipo, em uma bateria de de 7 testes efetuados contra a carga de uma lâmpada de 100W e 127V na tabela 5-2.

Tabela 5-2: Resultado do teste 1 de precisão do protótipo. Fonte: Autor

Testes	Tensão Variac (V)	Corrente Protótipo (A)	Corrente Amp 01 (A)	Corrente Amp 02 (A)	Corrente Amp 03 (A)
Teste 1	5,00	0,176	0,177	0,170	0,150
Teste 2	20,00	0,297	0,301	0,290	0,270
Teste 3	40,00	0,415	0,423	0,410	0,380
Teste 4	60,00	0,519	0,528	0,520	0,520
Teste 5	80,00	0,601	0,613	0,600	0,610
Teste 6	100,00	0,680	0,692	0,680	0,690
Teste 7	127,00	0,771	0,785	0,770	0,780

Para calcular o erro percentual relativo das medições de corrente, utilizou-se a equação 8, tomando como referência o valor medido pelo protótipo e o valor de referência do multímetro Fluke 8808A:

$$erro_relativo(\%) = \frac{valor\ medido - valor\ referencia}{valor\ referencia} \times 100 \quad (8)$$

Na tabela 5-3 pode-se verificar o erro percentual obtido para o conjunto de testes supracitados:

Tabela 5-3: Resultado de erro percentual do teste 1. Fonte: Autor

Testes	Tensão Variac (V)	Corrente Protótipo (A)	Corrente Amp 01 (A)	Erro (%)
Teste 1	5	0,176	0,177	0,57
Teste 2	20	0,297	0,301	1,35
Teste 3	40	0,415	0,423	1,93
Teste 4	60	0,519	0,528	1,73
Teste 5	80	0,601	0,612	1,83
Teste 6	100	0,68	0,692	1,76
Teste 7	127	0,771	0,785	1,82

Dessa forma, observa-se que a aquisição da grandeza elétrica de corrente está dentro da faixa de exatidão desejável, pois o conjunto apresentou erros na medição inferiores a 2%.

O segundo teste, conforme o método descrito na seção 4.2.2 e 4.2.3, gerou os valores observados na tabela 5-4, resultados de seis testes efetuados, onde a cada teste, uma lâmpada de 100W, 127V foi adicionada à carga. Foram usados os multímetros Fluke 8808A (referenciado como Amp 01), multímetro ICEL MD-5770 (referenciado como Amp 02) e alicate amperímetro YF-8020 (referenciado como Amp 03).

Tabela 5-4: Resultado do teste 2 de precisão do protótipo. Fonte: Autor

Testes	Número de Lâmpadas	Corrente Teórica (A)	Corrente Protótipo (A)	Corrente Amp 01 (A)	Corrente Amp 02 (A)	Corrente Amp 03 (A)
Teste 1	1	0,787	0,780	0,797	0,784	0,780
Teste 2	2	1,575	1,541	1,574	1,54	1,56
Teste 3	3	2,362	2,342	2,389	2,35	2,38
Teste 4	4	3,150	3,115	3,178	3,13	3,17
Teste 5	5	3,937	3,863	3,930	3,87	3,94
Teste 6	6	4,724	4,719	4,790	4,73	4,75

Para calcular o erro percentual das medições de corrente do segundo teste, também utilizou-se a equação 8, tomando como referência o valor medido pelo protótipo e o valor de referência do multímetro Fluke 8808A. Na tabela 5-5 pode-se verificar o erro percentual obtido para o conjunto de testes supracitados, comparando a corrente medida pelo protótipo e a corrente teórica calculada:

Tabela 5-5: Resultado de erro percentual do teste 2 (Corrente protótipo contra corrente teórica calculada).

Fonte: Autor

Testes	Número de Lâmpadas	Corrente Teórica (A)	Corrente Protótipo (A)	Corrente Teórica x Corrente Protótipo Erro (%)
Teste 1	1	0,787	0,782	-0,686
Teste 2	2	1,575	1,541	-2,147
Teste 3	3	2,362	2,342	-0,855
Teste 4	4	3,150	3,115	-1,099
Teste 5	5	3,937	3,863	-1,880
Teste 6	6	4,724	4,719	-0,115

Na tabela 5-6 pode-se verificar o erro percentual obtido para o conjunto de testes supracitados, comparando a corrente medida pelo protótipo e a corrente medida pelo Amperímetro Fluke 8808A:

Tabela 5-6: Resultado de erro percentual do teste 2 (Corrente protótipo contra Amperímetro). Fonte: Autor

Testes	Número de Lâmpadas	Corrente Protótipo (A)	Corrente Amperímetro Fluke 8808A (A)	Corrente Protótipo x Corrente Amperímetro Fluke Erro (%)
Teste 1	1	0,782	0,797	-1,882
Teste 2	2	1,541	1,574	-0,826
Teste 3	3	2,342	2,389	-1,967
Teste 4	4	3,115	3,178	-1,982
Teste 5	5	3,863	3,930	-1,705
Teste 6	6	4,719	4,790	-1,482

Ambos resultados de erro vistos na tabela 5-5 e tabela 5-6 demonstraram que aquisição da grandeza elétrica de corrente está dentro da faixa de exatidão desejável, pois o conjunto apresentou erros na medição de até 2%. A figura 5-2 mostra o resultado gráfico da comparação entre todos os erros percentuais calculados:

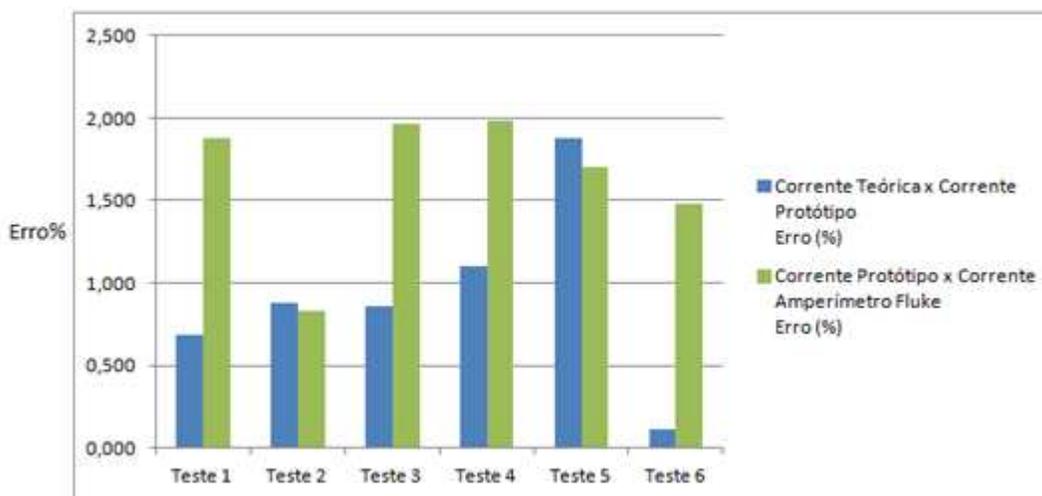


Figura 5-2: Gráfico do resultado da comparação dos erros percentuais. Fonte: Autor

5.3. Resultado do teste de comunicação

De acordo com a proposta de teste de comunicação apresentada na seção 4.2.5, foi feito um teste para transmitir as grandezas de tensão e corrente produzidas por uma lâmpada de 127V 100W durante 10 minutos. Após completar com sucesso o teste do protótipo e garantir a sua acurácia e valores resultantes dentro da faixa de erros adequada, o protótipo foi conectado individualmente a cada uma das placas de comunicação, e testes individuais foram conduzidos com o objetivo de confirmar que os dados gerados foram recebidos com sucesso pela plataforma Xively.

Para os testes de efetividade de sinal Wi-Fi, foi utilizado o software analisador de redes sem fio inSSIDer for Home [64] para verificar a potência do sinal e garantir a comunicação proposta. Dessa forma, foram efetuados dois testes:

1. Obtenção da potência do sinal Wi-Fi quando a placa e o protótipo estão distante 1 metro do roteador, onde obteve-se potência teórica máxima do sinal, que pode ser visto na figura 5-3;
2. Obtenção da potência do sinal Wi-Fi quando a placa e o protótipo estão distantes 15 metros do roteador, com paredes, onde obteve-se potência reduzida, que pode ser visto na figura 5-4.

Em ambas situações, o teste foi bem sucedido, possibilitando a comunicação entre o protótipo e roteador sem prejuízos na comunicação.

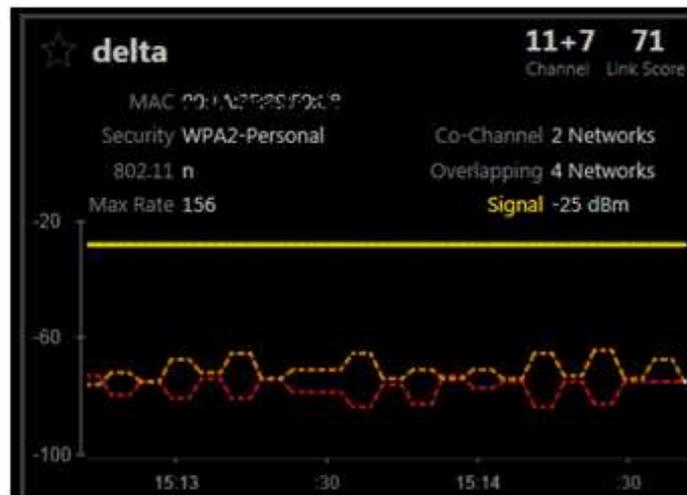


Figura 5-3: Potência do sinal Wi-Fi resultante do teste 1. Fonte: Captura de tela pelo Autor

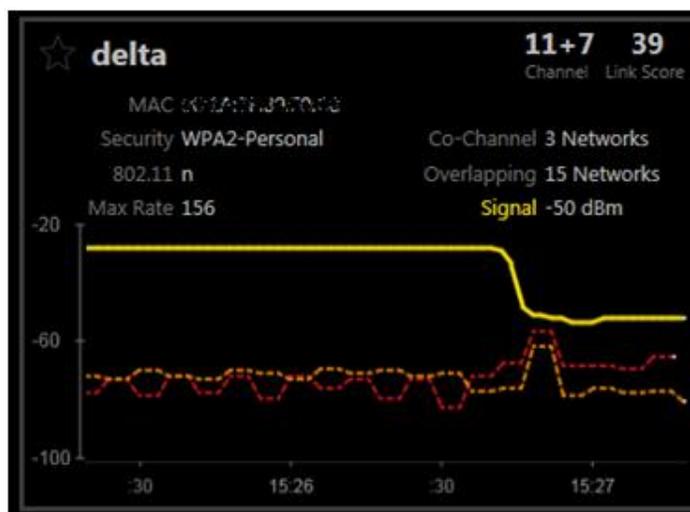


Figura 5-4: Potência do sinal Wi-Fi resultante do teste 2. Fonte: Captura de tela pelo Autor

No próximo teste, foi conectada a placa Wi-Fi e posteriormente a placa GSM/GPRS ao microcontrolador ATMEGA, onde foi feita a configuração de pinos SPI de forma que a placa Wi-Fi ou a placa GSM/GPRS utilizem o pino CS padrão conectado ao pino 10 e o pino CS do protótipo utilize o pino 9 do ATMEGA, configuração que pode ser vista na figura 5-5:

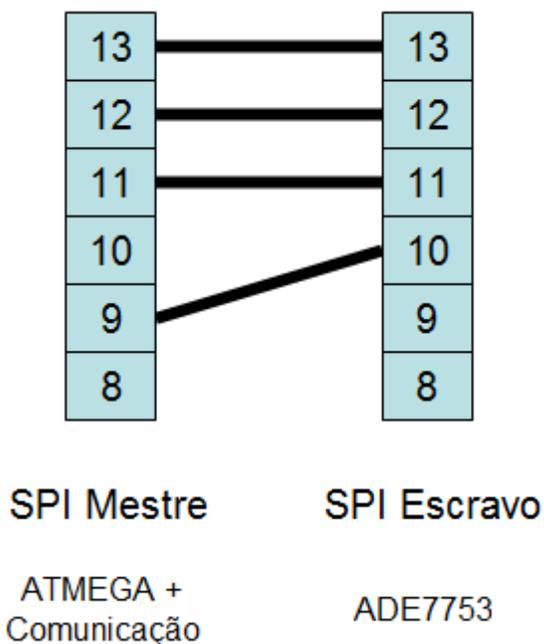


Figura 5-5: Conexão do barramento SPI Mestre/Escravo entre placas de comunicação. Fonte: Autor

Após essa conexão, a placa foi configurada com os parâmetros de nome de rede, usuário e senha de conexão ao roteador Wi-Fi e o firmware descrito na seção foi carregado no microcontrolador. Na figura 5-6 pode-se ver o resultado dos valores recebidos do protótipo através do terminal serial Arduino e os valores de medição de tensão e corrente:

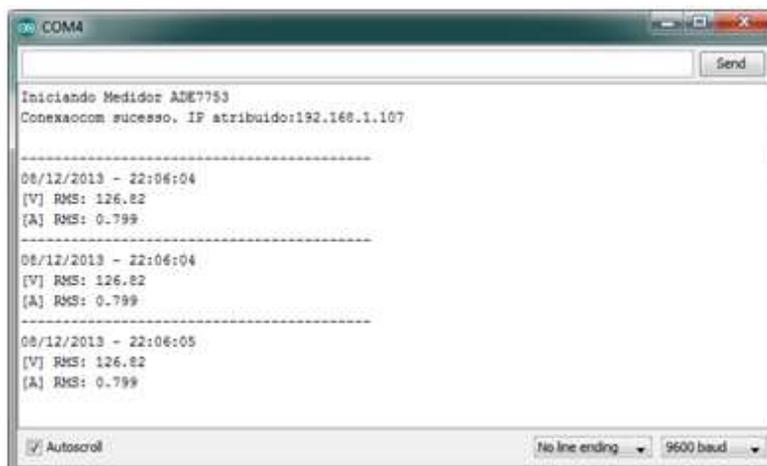


Figura 5-6: Resultado de medição exibido através de monitor serial. Fonte: Captura de tela pelo Autor

Da mesma forma, o resultado do envio dos valores acima podem ser confirmados pela consulta da página criada no serviço Xively, conforme figura 5-7:

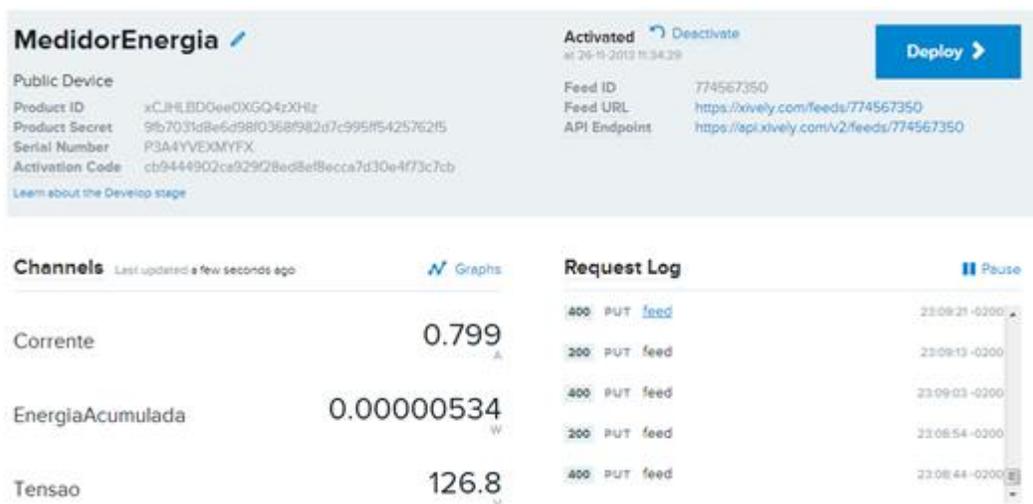


Figura 5-7: Resultado de medição exibido através do serviço Xively. Fonte: Captura de tela pelo Autor

Todos os valores foram acrescidos de um registro de data e hora para validar e garantir a transmissão dos dados conforme definido na proposta de arquitetura do software. Na figura 5-8 pode-se confirmar as entradas do log de requisições HTTP recebidas e o detalhe de uma entrada, respectivamente:

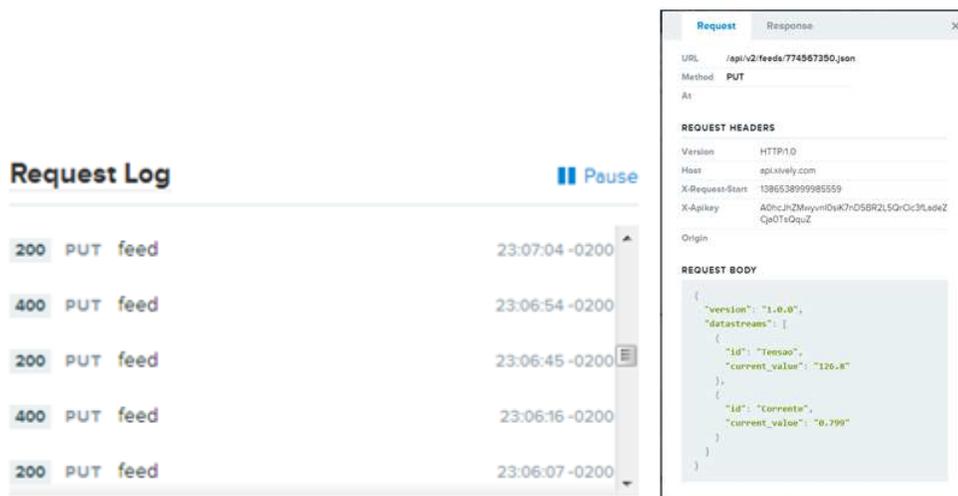


Figura 5-8: Resultado de medição exibido através do serviço Xively. Fonte: Captura de tela pelo Autor

Como forma de disponibilizar a informação de localização geográfica, foi utilizado um recurso manual do serviço Xively, que permite a indicação através de mapa da localização dos dispositivos adicionados na interface. Na figura 5-9 pode-se confirmar as entradas de latitude e longitude da localização do dispositivo:

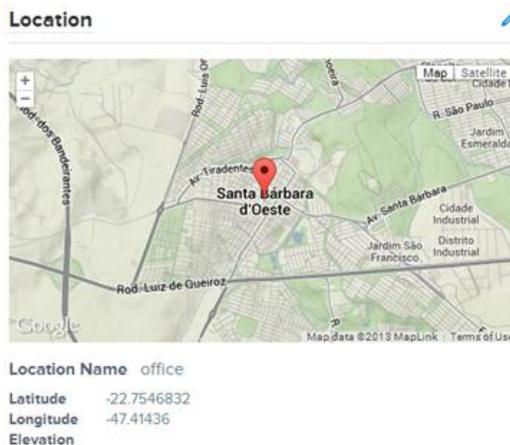


Figura 5-9: Localização geográfica através do serviço Xively. Fonte: Captura de tela pelo Autor

6. CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS

6.1. Comentário Finais

Foi desenvolvido um sistema capaz de efetuar a medição das grandezas de tensão e corrente (dentro dos limites propostos) e cálculo da energia acumulada e transmití-las através de variados meios de comunicação para uma aplicação na Internet, concluí-se que foi possível atingir a proposta com sucesso.

Em relação ao erro das medições das grandezas, o sistema apresentou resultados cujo erro ficou dentro do limite de 2%, que indica a possibilidade de desenvolvimento de produtos comerciais que irão atender as normas Brasileiras que regulamentam o setor energético.

6.2. Trabalhos Futuros

O assunto proposto na dissertação tem grande abrangência, e devido a esse fato, os possíveis desdobramentos são muitos para serem citados em sua totalidade, mas podem-se citar futuros trabalhos derivados, como:

- Medição e cálculo de energia pelo próprio circuito integrado ADE7753;
- Exploração das funcionalidades de qualidade de energia do circuito integrado ADE7753;
- Operação remota de funcionalidades de corte e religamento da unidade consumidora;
- Criação de opções de energia pré-paga;
- Criação de serviço concentrador de dispositivos;
- Criação de softwares de controle e relatórios de uso, para ajudar o consumidor a acompanhar o consumo de forma mais amigável;
- Explorar conexão cabeada via Ethernet RJ45;
- Explorar outras funcionalidades de medição disponíveis no circuito integrado ADE7753.

Outro fator importante é possibilitar uma janela de testes contínuos em uma residência (por exemplo, 30 dias), de forma a validar o desempenho do protótipo, bem como comparar o

resultado da medição de consumo de energia elétrica com a fatura oficial emitida pela empresa de distribuição de energia elétrica.

6.3. Produções decorrentes da pesquisa

Foi produzido um pôster para o 4º Workshop da Pós Graduação da Faculdade de Tecnologia da UNICAMP em 2012, com os resultados preliminares da pesquisa e protótipos até Outubro do ano citado e um segundo pôster para o 5º Workshop em 2013, com os resultados finais. Um artigo científico foi elaborado e tem previsão de submissão para o 2º trimestre de 2014.

REFERÊNCIAS

- [1] FERREIRA, M. C. A. F. **Perspectivas e Desafios para a Implantação das Smarts Grids: um estudo de caso dos EUA, Portugal e Brasil**. 2010. 60p. Monografia Bacharelado Instituto de Economia, IE/UFRJ, Rio de Janeiro.
- [2] SIEGELE, L. It's a smart world: A special report on smart systems. **The Economist**, v. 397, n. 8707 pSR3(2), p. 01, 2010.
- [3] HERTZOG, C. **Smart Grid Dictionary**. EUA: GreenSpring Marketing, 2012. 407p.
- [4] GOMES, R. C.; PRINTES, A. L.; RAMOS, C. M. **Proposta de Sistema com Arquitetura para Implementação de uma Smart Grid na Rede de Distribuição em Baixa Tensão**. 2009. Escola Superior de Tecnologia da Universidade do Estado do Amazonas, Manaus.
- [5] IEA, International Energy Agency. **Technology Roadmap: Smart Grids**. 2011. Disponível em http://www.iea.org/papers/2011/smartgrids_roadmap.pdf. Último acesso em 11/12/2013.
- [6] TEIXEIRA, C. A. **Entrevista com John O'Farrell, da Silver Spring Networks**. 2009. Disponível em <http://oglobo.globo.com/blogs/cat/posts/2009/11/12/entrevista-com-john-farrell-da-silver-spring-networks-240668.asp>. Último acesso em 11/12/2013.
- [7] TOLEDO, Fabio (Org.) **Desvendando as Redes Elétricas Inteligentes: Smart Grid Handbook**. São Paulo: Brasport, 2012. 336 p.
- [8] ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. **Implantação de Medição Eletrônica em Baixa Tensão**. 2009. Disponível em: http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/consulta_publica/documentos/CONCERT%20CONTRIBUI%20C3%87%20C3%95ES%20Nota_T%20C3%A9cnica_0013_2009.pdf. Último acesso em 11/12/2013.
- [9] ONS - Operador Nacional do Sistema Elétrico. **Mapa do Sistema de Transmissão Horizonte – 2012, SIN: Sistema Interligado Nacional do site da ONS**. Disponível http://www.ons.org.br/conheca_sistema/mapas_sin.aspx#. Último acesso em 11/12/2013.
- [10] ABINEE – Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica. **Smart Grid, Rede Inteligente, Visão ABINEE - 2010**. Disponível em: <http://www.abinee.org.br/informac/arquivos/smartgrid.pdf>. Último acesso em 11/12/2013.
- [11] POLITO, R. **Smart Grid movimentará R\$ 1,8 bi**. Portal Energia Hoje. 2010. Disponível em: <http://www.redeinteligente.com/2010/06/16/smart-grid-movimentara-r-18-bi/>. Último acesso em 11/12/2013.
- [12] ANEEL. **Resolução Normativa N° 502, de 7 de Agosto de 2012. Regulamenta sistemas de medição de energia elétrica de unidades consumidoras do Grupo B**. Disponível em <http://www.aneel.gov.br/cedoc/ren2012502.pdf>. Último acesso em 11/12/2013.

[13] DARBY, S. **The Effectiveness of Feedback on Energy Consumption: A Review for Defra of the Literature on Metering, Billing And Direct Displays**. 2006. Environmental Change Institute, University of Oxford. Disponível em <http://www.eci.ox.ac.uk/research/energy/downloads/smart-metering-report.pdf>. Último acesso em 11/12/2013.

[14] Centerpoint Energy and U.S. Department of Energy. **Pilot Project on Home Energy Use**. 2011. Disponível em http://www.centerpointenergy.com/staticfiles/CNP/Common/SiteAssets/doc/In_Home_Display_Survey_Results.pdf. Último acesso em 11/12/2013.

[15] City of Dubuque. **Smarter Electricity**. Disponível em <http://www.cityofdubuque.org/index.aspx?NID=1349>. Último acesso em 11/12/2013.

[16] City of Dubuque. **Smarter Water**. Disponível em <http://www.cityofdubuque.org/index.aspx?NID=1348>. Último acesso em 11/12/2013.

[17] City of Dubuque. **Smarter Water Pilot Study Results**. Disponível em <http://www.cityofdubuque.org/index.aspx?NID=1543>. Último acesso em 11/12/2013.

[18] Google Maps. **Smart Metering Projects Map**. Disponível em <https://maps.google.com/maps/ms?ie=UTF8&hl=en&msa=0&msid=115519311058367534348.000011362ac6d7d21187&ll=53.956086,14.677734&spn=23.864566,77.519531&z=4&om=1>. Último acesso em 11/12/2013.

[19] SANTOS, A. H. C.; FAGÁ, M. T. W.; SANTOS, E. M. The risks of an energy efficiency policy for buildings based solely on the consumption evaluation of final energy. **Electrical Power and Energy Systems Journal**. Volume 44, Issue 1, January 2013, Pages 70–77

[20] MOGHE, R.; YI Yang; LAMBERT, F.; DIVAN, D.; , Design of a low cost self powered “Stick-on” current and temperature wireless sensor for utility assets. **Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)**, 2010 IEEE , vol., no., pp.4453-4460, 12-16 Sept. 2010.

[21] ZAMBRANO, A.A.; LEON, M.A.; RIVAS, E.; , Phasor measurement unit using GPRS wireless connectivity, **Innovative Smart Grid Technologies (ISGT Latin America)**, 2011 IEEE PES Conference on , vol., no., pp.1-7, 19-21 Oct. 2011

[22] ANAN Fang; JIANCHUN Guo; LIPING Luo; , Remote Electric Power Network Monitoring System Based on GPRS, **Control, Automation and Systems Engineering**, 2009. CASE 2009. **IITA International Conference** on , vol., no., pp.229-231, 11-12 July 2009

[23] OpenMeter: Open Public Extended Network metering; **Deliverables**. Disponível em <http://www.openmeter.com>. Último acesso em 11/12/2013.

[24] DI LEO, G.; LANDI, M.; PACIELLO, V.; PIETROSANTO, A.; , Smart metering for demand side management, **Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC)**, 2012 IEEE International , vol., no., pp.1798-1803, 13-16 May 2012

- [25] RAHMATIAN, F.; , High-voltage current and voltage sensors for a smarter transmission grid and their use in live-line testing and calibration, **Power and Energy Society General Meeting**, 2010 IEEE , vol., no., pp.1-3, 25-29 July 2010
- [26] YUAN-PIN Tsai; KUN-LONG Chen; NANMING Chen; , Design of a Hall Effect Current Microsensor for Power Networks, **Smart Grid, IEEE Transactions on** , vol.2, no.3, pp.421-427, Sept. 2011
- [27] MASI, M. G.; PERETTO, L.; TINARELLI, R.; , Design and Performance Analysis of a Differential Current Sensor for Power System Applications, **Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on** , vol.PP, no.99, pp.1-9, 0
- [28] **OpenEnergyMonitor**. Disponível em [http:// openenergymonitor.org/emon/](http://openenergymonitor.org/emon/). Último acesso em 11/12/2013.
- [29] DUARTE, L. F. C.; ZAMBIANCO, J. D.; AIROLDI, D.; FERREIRA, E. C.; DIAS, J. A. S.; Characterization and Breakdown of the Electricity Bill using Custom Smart Meters: A Tool for Energy-Efficiency Programs, **International Journal of Circuits, Systems and Signal Processing**, 2011, vol 5, pp116-123.
- [30] CTEEP, Companhia de Transmissão de Energia Elétrica Paulista. **Nosso negócio, como a energia chega até sua casa**. Disponível em <http://www.cteep.com.br/>. Último acesso em 11/12/2013.
- [31] ANEEL - **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST**. 2011. Disponível em <http://www.aneel.gov.br/area.cfm?idArea=82>. Último acesso em 11/12/2013.
- [32] AFONSO, A. P.; FILONI, E. **Eletrônica: circuitos elétricos**. São Paulo: Fundação Padre Anchieta, 2011 (Coleção TécnicaInterativa. Série Eletrônica, v. 1). Manual técnico Centro Paula Souza
- [33] Edison Electric Institute (EEI). **Handbook For Electricity Metering. 10ed**. Edison Electric Institute, 2002. cap 7, p.152.
- [34] COELBA - Companhia de Eletricidade do Estado da Bahia. **Aprenda a Ler seu Medidor**. Disponível em <http://servicos.coelba.com.br/residencial/aprenda-a-ler-seu-medidor>. Último acesso em 11/12/2013.
- [35] GERWEN, R. V.; Saskia JAARSMA, S.; WILHITE, R., **Smart Metering. KEMA**, The Netherlands, July, 2006. Disponível em <http://www.leonardo-energy.org/smart-metering-briefing-paper>. Último acesso em 11/12/2013.
- [36] Medidor SGM1100TM IEC Smart Energy Meter, da GE, adaptado de <http://www.gedigitalenergy.com/SmartMetering/catalog/SGM1100.htm>. Último acesso em 11/12/2013.

- [37] Digikey. **Choosing an MCU for Smart Energy Meters**. Disponível em <http://www.digikey.com/us/en/techzone/microcontroller/resources/articles/choosing-mcu-for-smart-energy-meters.html>. Último acesso em 11/12/2013.
- [38] THOMAZINI, D.; ALBUQUERQUE, P. U.B. "**Sensores Industriais: Fundamentos e Aplicações**", 4ª Edição. São Paulo: Editora Érica. 2003.
- [39] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6856: Transformador de corrente**. Rio de Janeiro: ABNT, 2000.
- [40] KOON, W. "**Current Sensing for Energy Metering**". Analog Devices. Disponível em http://www.analog.com/static/imported-files/recommended_reading/688920132Current_sensing_for_meteringNew.pdf. Último acesso em 11/12/2013.
- [41] OpenEnergyMonitor. **Measuring AC Voltage with an AC to AC power adapter**. Adaptado de <http://openenergymonitor.org/emon/buildingblocks/measuring-voltage-with-an-acac-power-adapter>. Último acesso em 11/12/2013.
- [42] FILHO, S. de M. **Medição de Energia Elétrica**. 7ª edição Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1997.
- [43] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6855: Transformador de potencial**. Rio de Janeiro: ABNT, 2000.
- [44] VAIRAMUTHU, M.K.; NESAMONY, S.; ORLOWSKA, M.E.; SADIQ, S.W., "On the Design Issues of Wireless Sensor Networks for Telemetry," **Database and Expert Systems Applications**, 2005. Proceedings. Sixteenth International Workshop on , vol., no., pp.138,144, 26-26 Aug. 2005
- [45] ANEEL - Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST, **Módulo 5 - Sistemas de Medição, revisão 2**. 2011. Disponível em http://www.aneel.gov.br/visualizar_texto.cfm?idtxt=1871. Último acesso em 11/12/2013.
- [46] Qian Zhu; Ruicong Wang; Qi Chen; Yan Liu; Weijun Qin; , IOT Gateway: Bridging Wireless Sensor Networks into Internet of Things, **Embedded and Ubiquitous Computing (EUC), 2010 IEEE/IFIP 8th International Conference on** , vol., no., pp.347-352, 11-13 Dec. 2010
- [47] KUROSE, J. F.; ROSS, K. W. **Redes de Computadores e a Internet: Uma Abordagem Topdown**. 5ª Edição. São Paulo: Pearson Addison Wesley, 2010.
- [48] TANENBAUM, A. S. **Redes de Computadores**. 4ª Edição. Rio de Janeiro: Campus, 2003.
- [49] SVERZUT. J. U. **Redes GSM, GPRS, EDGE E UMTS – Evolução a Caminho da Quarta Geração (4G)**. São Paulo: Érica, 2008.

[50] Bettstetter, C.; Vogel, H.-J.; Eberspacher, J.; , "GSM phase 2+ general packet radio service GPRS: Architecture, protocols, and air interface," Communications Surveys & Tutorials, IEEE , vol.2, no.3, pp.2-14, Third Quarter 1999

[51] Analog Devices. **ADE7753: Single Phase Multifunction Energy Metering IC with di/dt Input (Serial-Port Interface)**. Disponível em: http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/ADE7753.pdf. Último acesso em 11/12/2013.

[52] Analog Devices. **AN-564: A Power Meter Reference Design Based on the ADE7756**. Disponível em http://www.analog.com/static/imported-files/application_notes/an564.pdf. Último acesso em 11/12/2013.

[53] Analog Devices. **AN-758: Creating a Reactive Energy Pulse Output Based on the ADE7753**. Disponível em http://www.analog.com/static/imported-files/application_notes/57571383197878AN_758_0.pdf. Último acesso em 11/12/2013.

[54] **YHDC**. Disponível em <http://www.yhdc.com/cn/product/25/>. Último acesso em 11/12/2013.

[55] **Cellular Shield with SM5100B**. Disponível em <https://www.sparkfun.com/products/9607>. Último acesso em 11/12/2013.

[56] **WiFly Wi-Fi Shield**. Disponível em <https://www.sparkfun.com/products/9954>. Último acesso em 11/12/2013.

[57] **GPS Shield**. Disponível em <https://www.sparkfun.com/products/10710>. Último acesso em 11/12/2013.

[58] **Arduino Software**. Disponível em <http://arduino.cc/en/Main/Software>. Último acesso em 11/12/2013.

[59] **Xively**. Disponível em <https://xively.com/>. Último acesso em 11/12/2013.

[60] **Energy Shield**. Disponível em http://www.olimex.cl/product_info.php?products_id=797. Último acesso em 11/12/2013.

[61] **JSON**. Disponível em <http://www.json.org/>. Último acesso em 11/12/2013.

[62] **Communicating with Xively: Data Formats**. Disponível em https://xively.com/dev/docs/api/communicating/data_formats/. Último acesso em 11/12/2013.

[63] Analog Devices. **Calibrating the ADE7753 for Watt, VAR, RMS and VA measurements**. Disponível em http://www.analog.com/static/imported-files/tutorials/299295143ADE7753_calibration.pdf. Último acesso em 11/12/2013.

[64] **inSSIDer for Home**. Disponível em <http://www.metageek.net/products/inssider/>. Último acesso em 11/12/2013.

B. Lista de componentes eletrônicos utilizados no protótipo

- 1 placa de circuito impresso de fibra de vidro 10cm x 10cm;
- 1 circuito integrado ADE7753 ARSZ
- 4 capacitores eletrolíticos 10uF
- 4 capacitores eletrolíticos 0,1 uF
- 4 capacitores poliéster 33nF
- 2 capacitores cerâmicos 22pF
- 1 resistor de 10K (5%)
- 1 resistor 18R (5%)
- 4 resistores 1K (5%)
- 1 resistor 50R (5%)
- 1 cristal 4MHz
- 2 Barras de pinos 40 pinos
- 1 conector estéreo
- 1 conector Jack P4 (2,1mm)
- 1 chave tátil

C. Arduino Duemilanove: principais características ⁶

- Microcontrolador: ATmega328P
- Voltagem de operação: 5V
- Voltagem de entrada (recomendado): 7-12V
- Voltagem de Entrada (limite): 6-20V
- Pinos digitais de Entrada/Saída: 14 (6 pinos possuem recurso PWM)
- Pinos de entrada analógica: 6
- Corrente por pino de entrada (CC): 40 mA
- Corrente por pino de entrada 3.3v (CC): 50 mA
- Memória Flash 32 KB (ATmega328) 2 KB usados pelo bootloader
- RAM: 2 KB (ATmega328)
- EEPROM: 1 KB (ATmega328)
- Velocidade: 16 MHz

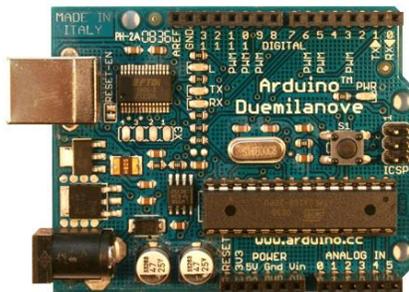


Figura 0-1: Placa Arduino Duemilanove

⁶ Adaptado de <http://arduino.cc/en/Main/arduinoBoardDuemilanove>

D. Características e Diagrama funcional de blocos do CI ADE7753 ⁷

- Alta acurácia; suporta as normas IEC 60687/61036/61268 and IEC 62053-21/62053-22/62053-23
- Integrador digital on-chip, que habilita interface direta com sensores de corrente com saída di/dt
- Amplificador de ganho programável (PGA) no canal de corrente permite conexão direta com resistores shunt e transformadores de corrente
- Medição de energia ativa, reativa e aparente, forma de onda amostrada e corrente e tensão RMS;
- Menos de 0,1% de erro na medição de energia ativa;
- Modo de acúmulo de energia positiva ativa disponível;
- Calibração digital para energia, fase e entrada de deslocamento;
- Sensor de temperatura on-chip ($\pm 3^{\circ}\text{C}$)
- Interface serial compatível com SPI®
- Pino de requisição de interrupção (IRQ) e registrador de estado

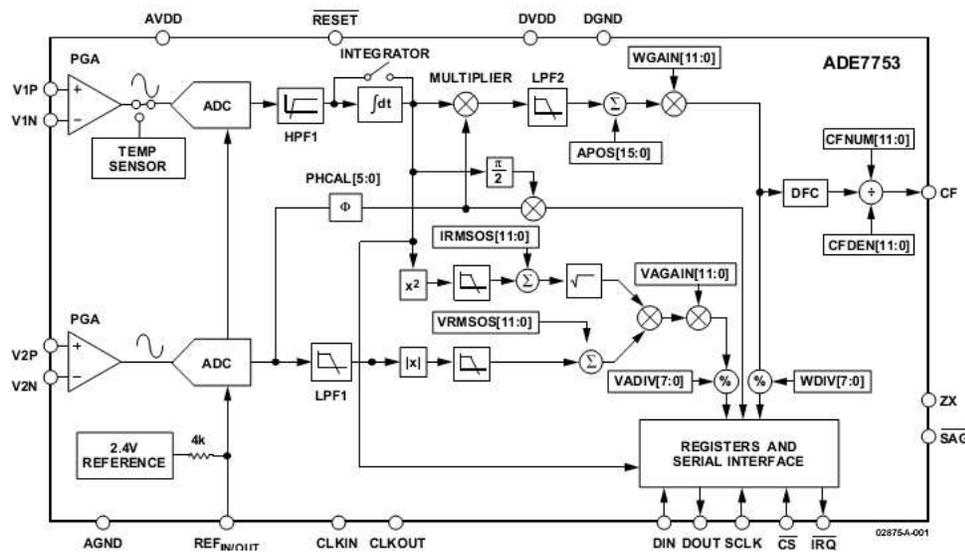


Figura 0-2: Diagrama de blocos CI ADE7753

⁷ Adaptado de <http://www.analog.com/en/analog-to-digital-converters/energy-measurement/ade7753/products/product.html>. Tradução nossa.

E. Características do transformador de corrente SCT-000-030 ⁸

SPECIFICATION

Customer Title : XiDi Technology

Product Name: Split-core current

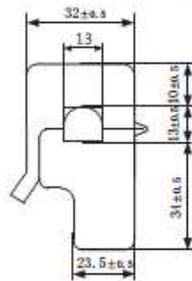
Manufacture Model : SCT-013-030

transformer

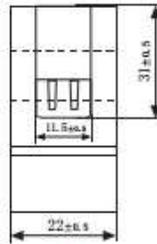
Characteristics: open size:13mm×13mm
 1m leading wire
 Core material:Ferrite
 Fire resistance property:in accordance with
 UL 94-V0
 Dielectric strength: 1500V AC/1min 5mA
 (between shell and output)



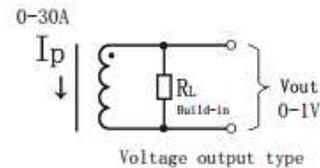
Outline size diagram: (in mm)



Front View



Side View



Voltage output type

Schematic Diagram

Typical table of technical parameters:

input current	output voltage	non-linearity	build-in sampling resistance (R _L)
0-30A	0-1V	±1%	62 Ω
turn ratio	resistance grade	work temperature	dielectric strength(between shell and output)
1800:1	Grade B	-25℃~+70℃	1500V AC/1min 5mA

Customer Sign:

Beijing YaoHuadechang Electronic Co.,Ltd
 Phone: 0355-7929499-803
 Cell: 13693334514
 Contact Name: Engineer Chen

Approve Sign: Chenjianping

2011-7-21

F. Código-fonte/firmware

O código abaixo contém integralmente o firmware principal carregado no microcontrolador ATMEGA. Ele foi baseado em um programa teste da empresa Olimex, também baseado em códigos e bibliotecas da empresa ATMEL.

O mesmo código foi utilizado para as placas de conexão Wi-Fi e GSM/GPRS e por isso lista-se apenas o código para placa Wi-Fi, visto que somente as bibliotecas de inicialização e comando de conexão GSM/GPRS se alteram, porém o princípio do código é o mesmo.

```
//Codigo adaptado de http://www.olimex.cl/pdf/EnergyShield/DemoTutorial.rar
// Bibliotecas ADE7753 pode ser encontrada no mesmo endereço
//inicializa bibliotecas
#include "ADE7753.h"
#include "Rtc.h"
#include <SPI.h>
#include <Wire.h>
#include <SoftwareSerial.h>
#include <WiFly.h>
#include "Credentials.h"

//define a relação de tensão
#define ratioTraf (127/12) //18.3
// seleção de pino SPI Mestre/Escravo
#define CS_ES 9 // CS Protótipo
#define CS_ETH 10 // CS Wi-Fi Shield
#define UPLOAD_LED 7

// Contador de uploads para o site
long Uploads=0;
byte EnergyIterationCounter=0;

//Inicializa o objeto da placa Wi-Fi
WiFlyClient client;

//endereço IP serviço Xively
IPAddress server(216,52,233,121);
```

```

//Cria variaveis globais
double kwhTotal;
double vIreais;
unsigned long ltmillis, tmillis, timems, previousMillis;
char charBuf[30];

void setup(){
  Serial.begin(9600);
  Serial.println("Iniciando Medidor ADE7753");
  delay(100);

  //Iniciando comunicação sem fio
  WiFly.begin();
  if (!WiFly.join(ssid, passphrase)) {
    Serial.println("Association failed.");
    while (1) {
      //aborta em caso de falha
    }
  }

  Serial.print("Conexao com sucesso. IP atribuido:");
  Serial.println(WiFly.ip());

  // configuracao pino SPI
  pinMode(CS_ES,OUTPUT);
  digitalWrite(CS_ES, HIGH);

  pinMode(UPLOAD_LED, OUTPUT);
  delay(1000);
}

uint32_t timeLastUpdated;
void loop() {
  ADE7753 meter = ADE7753();
  Rtc reloj = Rtc();

  //configura parametros iniciais do ADE7753

```

```

meter.analogSetup(GAIN_1,GAIN_1, 0,0,0,0);
meter.resetStatus();

long v1,i1,e1,e2,e3,ae1,ae2,ae3,r1,r2,r3;
float totEnergy = 0;
float kv,ki,ke,ka,kt,f1;
float voltage, current, energy, aparent, reactive, PF;
String typeLoad = "";
int t1;
int loopCounter = 1;

//Constantes de proporcionalidade
kv = (ratioTraf)*VOLTDIV*(0.5/0x2851EC); //(0.5/0x2851EC) Datasheet
ki = CURRDIV*(0.5/0x17D338); //(0.5/0x17D338) Datasheet
ke = (10/16.0)*VOLTDIV*CURRDIV/4096.0; // 1/(2^12)
kt=CLKIN/4; //registrado de periodo, resolucao x.y[us]/LSB -per bit-

while(1){
// 10 segundos
while(EnergyIterationCounter<10){
disableEthernet();
SPI.end();
SPI.setDataMode(SPI_MODE2);
SPI.setClockDivider(SPI_CLOCK_DIV32);
SPI.setBitOrder(MSBFIRST);
SPI.begin();
meter.enableChip();
delay(500);
v1=meter.vrms();
i1=meter.irms();
t1=meter.getPeriod();
f1 = kt/t1;
long tensao = long((kv*v1,2));
long corrente = long((ki*i1,3));
Serial.println("\r\n-----");
reloj.GetDate();
Serial.print(reloj.Date());

```

```

Serial.print(" - ");
Serial.print(reloj.Time());
if ( ((ki*i1) <= 0.03) || ((kv*v1) <= 1.12) ){
  Serial.print("\r\n[A] RMS: 0.00");
  Serial.print("\r\n[V] RMS: 0.00");
  kwhTotal = kwhTotal + 0;
  Serial.print("\r\nkwhTotal: ");
  Serial.print(kwhTotal,10);
} else{
  Serial.print("\r\n[V] RMS: ");
  Serial.print(kv*v1,2);
  Serial.print("\r\n[A] RMS: ");
  Serial.print( ki*i1,3 );
  //CALCULO DE ENERGIA ACUMULADA
  kwhTotal = kwhTotal + (((ki*i1,3)*(kv*v1,2))/1000.0) * 1.0/3600.0);
  Serial.print("\r\nkwhTotal: ");
  Serial.print(kwhTotal,10);
}
meter.disableChip();
SPI.end();
EnergyIterationCounter++;
}
EnergyIterationCounter=0;
SPI.setDataMode(SPI_MODE0);
SPI.setClockDivider(SPI_CLOCK_DIV4);
SPI.setBitOrder(MSBFIRST);
SPI.begin();
enableEthernet();
delay(500);

int length = 0;
String data = data + "\n" + "{\"version\":\"1.0.0\",\"datastreams\" : [ {\"id\" : \"Tensao\",\"current_value\" :
\"\" + String(tensao) + "\",\"
+ \"{\"id\" : \"Corrente\",\"current_value\" : \"\" + String(tensao) + "\",\"
+ \"{\"id\" : \"Energia\",\"current_value\" : \"\" + String(kwhTotal) + "\" } ] }";
length = data.length();

```

```

Serial.println("\nconnecting Xively...");
if (client.connect("api.xively.com", 80)) {
  client.println("PUT /v2/feeds/" + String(FEEDID) + ".json HTTP/1.1");
  client.println("Host: api.xively.com");
  client.println("X-ApiKey: " + String(APIKEY));
  client.println("Content-Length: " + String(length));
  client.print("Connection: close");
  client.println();
  client.print(data);
  client.println();
  // Atualiza contador
  digitalWrite(UPLOAD_LED, HIGH);
  delay(1000);
  Uploads++;
  Serial.print("Uploads: ");
  Serial.println(Uploads);
  digitalWrite(UPLOAD_LED, LOW);
} else {
  Serial.println("conexao falhou");
}
while (client.available()) {
  // verifica sucesso de transmissao (HTTP/1.1 200 OK)
  Serial.write(client.read());
}

if (client.connected()) {
  client.stop();
  Serial.println("desconectado.");
}
}

void enableEthernet(){
  digitalWrite(CS_ETH, LOW);
}

void disableEthernet(){
  digitalWrite(CS_ETH, HIGH);
}
}

```