



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA E COMPUTAÇÃO

FELIPE CASTRO ARAUJO

SISTEMA DE MONITORAMENTO DO CONSUMO ELÉTRICO RESIDENCIAL
COM UTILIZAÇÃO DE MEDIDORES DE ENERGIA ELÉTRICA COM
COMUNICAÇÃO SEM FIO PARA MEDIÇÃO E VERIFICAÇÃO EM
PROGRAMAS DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA.

CAMPINAS
2018

FELIPE CASTRO ARAUJO

SISTEMA DE MONITORAMENTO DO CONSUMO ELÉTRICO RESIDENCIAL
COM UTILIZAÇÃO DE MEDIDORES DE ENERGIA ELÉTRICA COM
COMUNICAÇÃO SEM FIO PARA MEDIÇÃO E VERIFICAÇÃO EM
PROGRAMAS DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA.

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação da Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação (FEEC) da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Eletrônica, Microeletrônica e Optoeletrônica.

Orientador: Prof. Dr. Elnatan Chagas Ferreira
Coorientador: Prof. Dr. Luís Fernando Caparroz Duarte

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO
FINAL DA DISSERTAÇÃO DEFENDIDA PELO
ALUNO FELIPE CASTRO ARAUJO, E
ORIENTADA PELO PROF. DR. ELNATAN
CHAGAS FERREIRA

CAMPINAS
2018

Agência(s) de fomento e nº(s) de processo(s): CAPES

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3561-956X>

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura
Luciana Pietrosanto Milla - CRB 8/8129

Ar15s Araujo, Felipe Castro, 1986-
Sistema de monitoramento do consumo elétrico residencial com utilização de medidores de energia elétrica com comunicação sem fio para medição e verificação em programas de eficiência energética / Felipe Castro Araujo. – Campinas, SP : [s.n.], 2018.

Orientador: Elnatan Chagas Ferreira.
Coorientador: Luís Fernando Caparroz Duarte.
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação.

1. Energia elétrica - Medição. 2. Eficiência energética. 3. Transmissão infravermelho. I. Ferreira, Elnatan Chagas, 1955-. II. Duarte, Luís Fernando Caparroz, 1980-. III. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. IV. Título.

Informações para Biblioteca Digital

Título em outro idioma: Residential electric consumption monitoring system using electric meters with wireless communication for measurement and verification in energy efficiency programs

Palavras-chave em inglês:

Electrical energy - Measurement

Energy efficiency

Infrared transmission

Área de concentração: Eletrônica, Microeletrônica e Optoeletrônica

Titulação: Mestre em Engenharia Elétrica

Banca examinadora:

Luís Fernando Caparroz Duarte [Coorientador]

José Antonio Siqueira Dias

Flávio José de Oliveira Moraes

Data de defesa: 06-04-2018

Programa de Pós-Graduação: Engenharia Elétrica

COMISSÃO JULGADORA - DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Candidato: Felipe Castro Araujo RA: 109282

Data da Defesa: 06 de abril de 2018

Título da Tese: " SISTEMA DE MONITORAMENTO DO CONSUMO ELÉTRICO RESIDENCIAL COM UTILIZAÇÃO DE MEDIDORES DE ENERGIA ELÉTRICA COM COMUNICAÇÃO SEM FIO PARA MEDIÇÃO E VERIFICAÇÃO EM PROGRAMAS DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA”.

Prof. Dr. Luís Fernando Caparroz Duarte (Presidente, UTFPR)

Prof. Dr. Flávio José de Oliveira Moraes (FCE/UNESP)

Prof. Dr. José Antônio Siqueira Dias (FEEC/UNICAMP)

A ata de defesa, com as respectivas assinaturas dos membros da Comissão Julgadora, encontra-se no processo de vida acadêmica do aluno.

Agradecimentos

Aos meus pais, Elson Luiz de Araujo e Doracina Aparecida de Castro Araujo, pelo amor incondicional, conselhos e incentivos, além de dedicarem a vida à educação dos filhos. Amo vocês.

À minha irmã, Carla Cristina Castro Araujo e aos meus primos, tios e tias que sempre me incentivaram e estiveram presentes em todos os momentos importantes da minha vida e dão exemplos de união familiar.

Ao Prof. Dr. Elnatan Chagas Ferreira, pela orientação sábia na condução da pesquisa, sempre perspicaz; pela oportunidade, esclarecimentos, apoio e compreensão de minhas dificuldades e necessidades.

Ao Prof. Dr. José Antônio Siqueira Dias, pelos ensinamentos, apoio, companheirismo e amizade no decorrer dos estudos realizados na UNICAMP.

Ao Prof. Dr. Luís Fernando Caparroz Duarte, pela coorientação, pela amizade e por todo o apoio durante a realização do mestrado.

Aos meus amigos do Departamento de Semicondutores, Instrumentos e Fotônica pela paciência, dedicação e apoio, em especial ao Flávio, Rodrigo Bacurau, Alex e Pedro que contribuíram de diversas formas para a realização deste trabalho, e dos amigos de Campinas-SP, Itajubá-MG e Paranaíba-MS, que sempre me incentivaram.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo financiamento de meus estudos por meio de bolsa.

À Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Programa de Engenharia Elétrica e da Computação por oportunizar a realização deste mestrado, com laboratórios e equipamentos que favoreceram a realização da pesquisa, e aos docentes pela contribuição em minha formação, colaboradores e eficazes ao dividir seus conhecimentos.

RESUMO

Com as necessidades atuais de economia de energia elétrica no Brasil e a falta de exatidão do perfil traçado dos consumidores pelas Pesquisas de Posses de Equipamentos e Hábitos, surge a necessidade de obter medidores de energia elétrica com a finalidade de traçar um perfil mais exato do consumidor brasileiro para colaborar nas tomadas de decisões das concessionárias de energia em relação a seus projetos de conservação de energia. Nesse sentido, este trabalho teve como objetivo idealizar, projetar, construir e realizar testes de um sistema para medição e verificação do consumo elétrico residencial de famílias de baixa renda, com a utilização de tecnologia infravermelha de baixo custo, em programas de eficiência energética. Foi desenvolvido um sistema de comunicação infravermelho que atenda as perspectivas do projeto e também foi fabricado uma placa de circuito impresso com todos os componentes necessários para aquisição de dados, alimentação do circuito, do sistema de comunicação infravermelho e de um circuito de gravação do microcontrolador. Como resultado da pesquisa verifica-se que o medidor desenvolvido armazena as informações coletadas e estas são posteriormente transferidas, por meio de infravermelho, para um dispositivo receptor. Após realizar todas as coletas, o dispositivo receptor transfere todos os dados para um computador onde um programa os analisa e os transforma em gráficos para uma melhor visualização. O *hardware* do dispositivo coletor é composto por um microcontrolador, um cartão de memória SD, um demodulador infravermelho e um LED transmissor de Infravermelho. O *firmware* desenvolvido é composto por um protocolo de comunicação half-duplex infravermelho entre os dispositivos medidores e o receptor, de modo a possibilitar ao transmissor a garantia da transmissão das informações corretas. Conclui-se que esse desenvolvimento é relevante por contribuir para a maior eficiência no uso da energia elétrica por parte dos consumidores finais devido à possibilidade de terem, a qualquer momento, informações pertinentes, seja do consumo individual de cada aparelho elétrico ou do total de energia consumida por todos.

Palavras-chave: Medidor de energia elétrica. Comunicação infravermelha. Medição e Verificação. Programa de eficiência energética.

ABSTRACT

The current demand for electric energy savings in Brazil and the lack of accuracy of the consumers profile outlined by the Research of Equipment Possession and Habits have led to the need of electric energy meters in order to outline a more exact profile of the Brazilian consumers, to collaborate in the decision making of energy concessionaires in relation to their energy conservation projects. In this regard, the objective of this work is to idealize, design, construct and test a system for measuring and verifying the residential electric consumption of low-income families using low-cost infrared technology in energy efficiency programs. An infrared communication system that meets the design prospects and a printed circuit board with all the necessary components for data acquisition and to power up the circuit, the infrared communication system and the microcontroller programming circuit have been developed. As a result of the research, it was verified that the developed meter stores the collected information and those are subsequently transferred, through infrared, to a receiving device. After performing all the collections, the receiving device transfers all the data to a computer where a program analyzes them and turns them into graphs for a better visualization. The hardware of the collector device consists of a microcontroller, an SD memory card, an infrared demodulator and an infrared transmitter LED. The firmware created consists of an infrared half-duplex communication protocol between the measuring devices and the receiver in order to make it possible for the transmitter to guarantee the correct information transmission. One can conclude that this development is relevant because it contributes to a better efficiency of electric energy usage by the final consumers, since they have the possibility of getting, at any moment, pertinent information, either of the individual consumption of each electric apparatus, or of the total energy consumed.

Keywords: Electric energy meter. Infrared communication. Measurement and Verification. Energy efficiency program.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Esquema de medição centralizado em um computador	31
Figura 2: Esquema de medição com concentrador de dados	31
Figura 3: Esquema de medição com medidores dotados com memória de massa	33
Figura 4: Arquitetura selecionada com medidores dotados com memória de massa e infravermelho	34
Figura 5: Diagrama em blocos smart plug	37
Figura 6: Medidor TP-LINK HS100	40
Figura 7: Medidor de energia elétrica desenvolvido	44
Figura 8: Concentrador de medidas desenvolvido	49
Figura 9: Fluxograma do medidor de energia elétrica desenvolvido.	50
Figura 10: Fluxograma do controle receptor de dados	52
Figura 11: Diagrama de sequência exemplificando as mensagens entre os módulos	53
Figura 12: Tela inicial do programa desenvolvido.	54
Figura 13: Tela com os resultados do programa desenvolvido.	54
Figura 14: Arquivo gerado pelo medidor de energia elétrica desenvolvido.	56
Figura 15: Arquivo gerado pelo medidor de energia elétrica desenvolvido com informações salvas a cada minuto.	57
Figura 16: Tela Inicial do Programa para a entrada dos arquivos.	59
Figura 17: Imagem do Programa com os dados inseridos	59

LISTA DE TABELAS E GRÁFICOS

Tabela 1: situação dos principais reservatórios brasileiros em janeiro de 2014	15
Tabela 2: Investimento total versus energia economizada por projeto.	20
Tabela 3: Efeitos de alguns tipos de programas de eficiência energética promovidos pelo setor público	24
Tabela 4: Micromedidores inteligentes de energia disponíveis no mercado	37
Tabela 5: Comparação das medidas adquiridas por diferentes medidores	58
Tabela 6: Lista de preço dos componentes do medidor de energia elétrica desenvolvido	60
Gráfico 1: Investimentos por usos finais e tipologias específicas de projeto	18
Gráfico 2: Investimentos por tipologias.	20
Gráfico 3: Defasagem de fase	46

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A/D	- Analógico/digital
ACLK	- Clock auxiliar
ANEEL	- Agência nacional de energia elétrica
CEMIG	- Companhia Energética de Minas Gerais S.A.
ESCOs	- Empresas de Serviços de Conservação de Energia (<i>"Energy Service Companies"</i>)
EVO	- Efficiency Valuation Organization
FNDCT	- Fundo Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
GCH	- Grandes centrais hidroelétricas
GEM	- Gestão Energética Municipal
GW	- Gigawatt
Hz	- Hertz
INEE	- Instituto Nacional de Eficiência Energética
INMETRO	- Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
JTAG	- Joint Test Action Group
kW	- Quilowatt
kWh	- Quilowatt-hora
M&V	- Medição e Verificação
MCLK	- Clock principal (<i>"Main Clock"</i>)
MME	- Ministério de Minas e Energia
MRE	- Medidas de racionalização de energia
MW	- Megawatt
MWh	- Megawatt-hora
ONS	- Operador Nacional do Sistema Elétrico
PCH	- Pequenas centrais hidrelétricas
PDE	- Plano Decenal de Expansão de Energia
PEE	- Projetos de Eficiência Energética
PPH	- Pesquisa de Posses e Hábitos de Uso
Procel	- Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica
PUC-Rio	- Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro
RMS	- Raiz do valor quadrático médio (root mean square)
SD	- Secure Digital Card
SEB	- Sistema Elétrico Brasileiro
SINPHA	- Sistema de Informação de Posses e Hábitos de uso de Aparelhos Elétricos
UART	- Receptor/transmissor assíncrono universal
UNICAMP	- Universidade Estadual de Campinas
USAID	- Agência dos Estados Unidos para o Desenvolvimento Internacional
USB	- Universal Serial Bus

SUMÁRIO

1	Introdução	13
1.1	Contextualização	13
1.2	Objetivos	20
1.3	Organização do texto	21
2	Revisão bibliográfica	22
2.1	Eficiência Energética e conservação de energia	22
2.2	Medição e Verificação (M&V)	25
2.3	Pesquisa de Posses e Hábitos de Uso	27
2.3.1	Breve Histórico	28
2.3.2	Tipos de Pesquisa	29
2.4	Técnicas de medição de energia elétrica para eficiência energética	30
2.4.1	Leitura centralizada em um computador	30
2.4.2	Leitura centralizada em um concentrador de dados	31
2.4.3	Medidores com memória de massa	32
2.4.4	Sistema Proposto	33
2.5	- Estudo de Caso	35
2.5.1	Smart Plug TP-LINK HS100	39
3	Metodologia de Pesquisa	41
4	Módulo Medidor de Energia Elétrica	43
4.1	Módulo Medidor	43
4.2	Módulo do Concentrador de Medidas	48
4.3	<i>Firmware</i> do Módulo Medidor	49
4.4	<i>Firmware</i> do Controle Receptor dos dados	51
4.5	Programa para o usuário	53
5	Resultados	56
6	Conclusões e Trabalhos Futuros	62
6.1	Conclusões	62

6.2 Trabalhos Futuros	63
Referências	64
Apêndice A – Fonte e <i>front-end</i> do medidor desenvolvido	67
Apêndice B – Microcontrolador e componentes do medidor desenvolvido	68
Apêndice C – Conector da bateria do controle receptor de dados	69
Apêndice D – Microcontrolador e componentes do controle receptor de dados	70
Apêndice E – Código fonte do <i>Software</i> desenvolvido em LabVIEW	71

1 Introdução

1.1 Contextualização

As recentes discussões mundiais sobre as alterações climáticas elevaram as preocupações do consumo consciente da energia elétrica, já que as formas mais utilizadas de geração de energia são apontadas como fontes emissoras de gases poluentes que contribuem com o aumento do efeito estufa e consequentemente, com alterações do clima. Dessa forma, o consumo racional da energia elétrica, realizada por meio de economia por parte dos consumidores finais ou por programas de eficiência energética, é uma das melhores formas de combater a ação desses efeitos no nosso planeta.

No Brasil, devido à enorme quantidade de rios caudalosos que correm sobre planaltos e depressões, a maior parte da energia elétrica disponível é proveniente de usinas hidrelétricas, que podem ser classificadas de acordo com a potência de geração de energia em dois tipos principais: pequenas centrais hidrelétricas (PCH's), cuja potência seja superior a 3MW e até 30 MW, com um reservatório de até 13 km² de área; e as grandes centrais hidroelétricas (GCH's), que produzem acima de 30 MW de energia [1].

A matriz de geração do Sistema Elétrico Brasileiro (SEB) é quase integralmente hidrotérmica, isto é, 93,03% da capacidade de geração vêm de usinas hidrelétricas, que predominam; e de térmicas – movidas a óleo, gás, carvão e combustível nuclear [2].

Em junho de 2017, o Brasil possuía 219 usinas hidrelétricas em operação com uma potência instalada de 101.138.278 kW, o que corresponde a um total de 61,18% de toda energia produzida pelo Brasil [2]. Outra fonte de energia que tem crescido bastante no país é a produzida pelas usinas termoelétricas, cuja potência outorgada é de 42.749.371 kW, em 2.925 empreendimentos, responsáveis por 26,92% da energia produzida no Brasil [2].

Conforme dados da Aneel, de dezembro de 2001, a predominância da capacidade de energia pelas usinas hidrelétricas já foi bem maior, e chegou a representar 82,21% do total de energia gerada (61.554 MW), enquanto as usinas

termoelétricas eram responsáveis por 14% (10.481,14 MW). Esse aumento da participação das fontes térmicas se deu a partir da crise energética de 2001, quando ocorreu a descontinuidade dos investimentos privados decorrente do processo de mudança da legislação do setor elétrico entre 2003 e 2005 e também pela forte oposição da população aos projetos de construção de novas usinas hidrelétricas [3].

De acordo com a matriz projetada no Plano Decenal de Expansão de Energia (PDE), do Governo Federal, há previsão de mudanças ainda maiores para 2023, com um incremento das fontes renováveis de energia - biomassa, PCH, eólica e solar - as quais passarão de 20% no início de 2018 para 24% em dezembro de 2023. Já as usinas termelétricas, movidas a combustíveis fósseis, continuarão com a sua participação na matriz energética, oscilando entre 13,4% e 14,5%, no mesmo período, enquanto as usinas nucleares passarão de 1,3% para 1,7% da capacidade do parque instalado, devido à entrada de Angra 3. Enquanto isso, a participação das usinas hidrelétricas de grande porte terá uma redução de 5,5% no mesmo período, em relação ao montante total de oferta de geração, mesmo com o aumento significativo da capacidade instalada de aproximadamente 15 GW [4].

Em junho de 2017 o Brasil possuía 4.673 empreendimentos em operação, entre centrais geradoras undi-elétrica, eólica e solar fotovoltaica, pequenas centrais hidrelétricas, usinas hidrelétricas, termelétricas e termonuclear, cujo total foi de 152.357.132 kW de potência instalada, com uma previsão de uma adição de 24.412.722 kW na capacidade de geração nos próximos anos, proveniente dos 265 empreendimentos em construção e mais 547 com construção não iniciada [2].

Porém, a falta de chuvas que se iniciou em 2014, principalmente na região sudeste, causou um grande impacto na quantidade de água armazenada nos reservatórios das hidrelétricas brasileiras. Conforme a tabela 1, fornecida pela ONS, a maioria dos reservatórios da região sudeste apresentou uma situação crítica, com menos de 20% da capacidade de armazenamento de água, com destaque para as usinas de Ilha Solteira e de Três Irmãos, no rio Paraná, as quais, após a criação do canal de Pereira Barreto, passaram a ter um mesmo reservatório e ficaram com o volume útil zerado. Entretanto, essas usinas continuaram gerando energia elétrica com a capacidade mínima, pois o cálculo da ONS leva em consideração a navegabilidade da hidrovia no canal em vez de calcular o volume na linha da boca da turbina [5].

Tabela 01: situação dos principais reservatórios brasileiros em janeiro de 2014

REGIÃO SUDESTE / CENTRO-OESTE (situação atual 16.88%)		
Principais Bacias	Principais Reservatórios	Situação Atual
Rio Paranaíba		
37,92% da região	Emborcação (10,82% da região)	13%
	Nova Ponte (11,39% da região)	10.41%
	Itumbiara (7,89% da região)	10.67%
	São Simão (2,54% da região)	53.98%
Rio Grande		
25,73% da região	Furnas (17,42% da região)	9.87%
	Mascarenhas de Moraes (2,18% da região)	14.72%
	Marimbondo (2,72% da região)	11.85%
	Água Vermelha (2,22% da região)	17.39%
Rio Paraná		
3,07% da região	Ilha/3 Irmãos (3,07% da região)	0%
Rio Paranapanema		
5,81% da região	Jurumirim (2,00% da região)	20.76%
	Chavantes (1,63% da região)	17.97%
	Capivara (1,95% da região)	22.44%
Outras		
(27,53% da região)		

Fonte: Operador nacional do sistema elétrico (2014)

De acordo com o Procel (Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica), no Brasil o total desperdiçado por ano chega a 40 milhões de quilowatts, dentre os quais, 22 milhões são esbanjados pelos consumidores finais - indústrias, residências e comércio. O restante é perdido pelas concessionárias de energia por meio de perdas técnicas e problemas na distribuição [6].

Sabe-se também que diversas medidas de redução de consumo de energia elétrica, como a substituição de lâmpadas incandescentes por fluorescentes e a adequação de motores de indução às cargas acionadas requerem investimentos na ordem de 5 a 15 US\$/MWh economizados, custo bem menor se comparado ao requerido para gerar essa energia a partir dos sistemas convencionais do Sistema Elétrico, estimado em 60 US\$/MWh [7].

Para diminuir esse desperdício e estabelecer um programa de eficiência energética, faz-se necessário o monitoramento do consumo de energia elétrica e evidenciar para o consumidor a quantidade de quilowatts consumidos por todos os seus equipamentos eletroeletrônicos, para que, conscientizado, possa controlar sua utilização, bem como adaptar suas atividades para executá-las em horários de menor demanda [7] e mudar de hábitos para evitar desperdícios.

Para isso, o governo tem incentivado os projetos de Medição e Verificação de energia das concessionárias, ou seja, a utilização de medidas para determinar a economia real em uma instalação, seja residencial, comercial ou industrial, por um programa de gestão de energia com a finalidade de melhorar a eficiência no setor. Devido à impossibilidade de medir diretamente essa economia, pode-se obtê-la pela comparação do consumo medido antes e depois da execução de projetos que visam à economia de energia elétrica, com a realização dos ajustes necessários, consideradas as possíveis alterações nas condições.

Essas medidas que melhoram a eficiência energética são caracterizadas por medidas de racionalização de energia (MRE), as quais permitem obter uma redução do consumo e dos custos da energia elétrica de uma determinada instalação. Para que isso ocorra, é necessário realizar investimentos em ações de monitoramento de consumo para obter uma informação precisa dos custos adicionais a serem implicados e também da escolha de uma metodologia de Medição e Verificação. Essas referências são solicitadas pelas empresas que investem em eficiência energética para aferirem a economia obtida, assim como preverem seu tempo de duração futura [8].

Uma das formas de obter uma resposta sobre o padrão de consumo de energia elétrica dos consumidores finais é por meio das Pesquisas de Posse de Equipamentos e Hábitos, realizadas por meio de uma pesquisa declaratória com os consumidores, com o objetivo de traçar um perfil de posses e hábitos de consumo de equipamentos elétricos.

Entretanto, novas formas de realizar essa pesquisa têm surgido com o propósito de melhorar esses dados por meio de medições do consumo de energia elétrica em tempo real e armazenamento dessas medidas para posterior análise do comportamento do usuário de forma mais exata. Dessa forma o governo e as

concessionárias de energia terão mais detalhes do perfil do consumidor para a tomada de decisões relativas a um planejamento de economia no uso.

No Brasil o investimento em eficiência energética é uma oportunidade para a obtenção de grandes benefícios econômicos e ambientais. Os estudos para seu dimensionamento ainda são incipientes, mas o potencial econômico para a redução de perdas de energia elétrica é enorme, assim como o mercado de projetos de eficiência energética nos setores industrial e de serviços é potencialmente alto, na ordem de US\$ 300 milhões por ano, não somados os pequenos projetos de cogeração de energia, inferiores a 10MW, que possuem um grande mercado. Apenas uma pequena parte desse potencial tem sido aproveitado, por volta de 5% [9].

No ano de 2020 está previsto que as residências e os prédios comerciais utilizem 31% da energia elétrica disponível nos países em desenvolvimento e reduzir essa ineficiência energética deve ser prioridade nas políticas energéticas desses países em paralelo com as políticas nos setores industriais e de transporte [10].

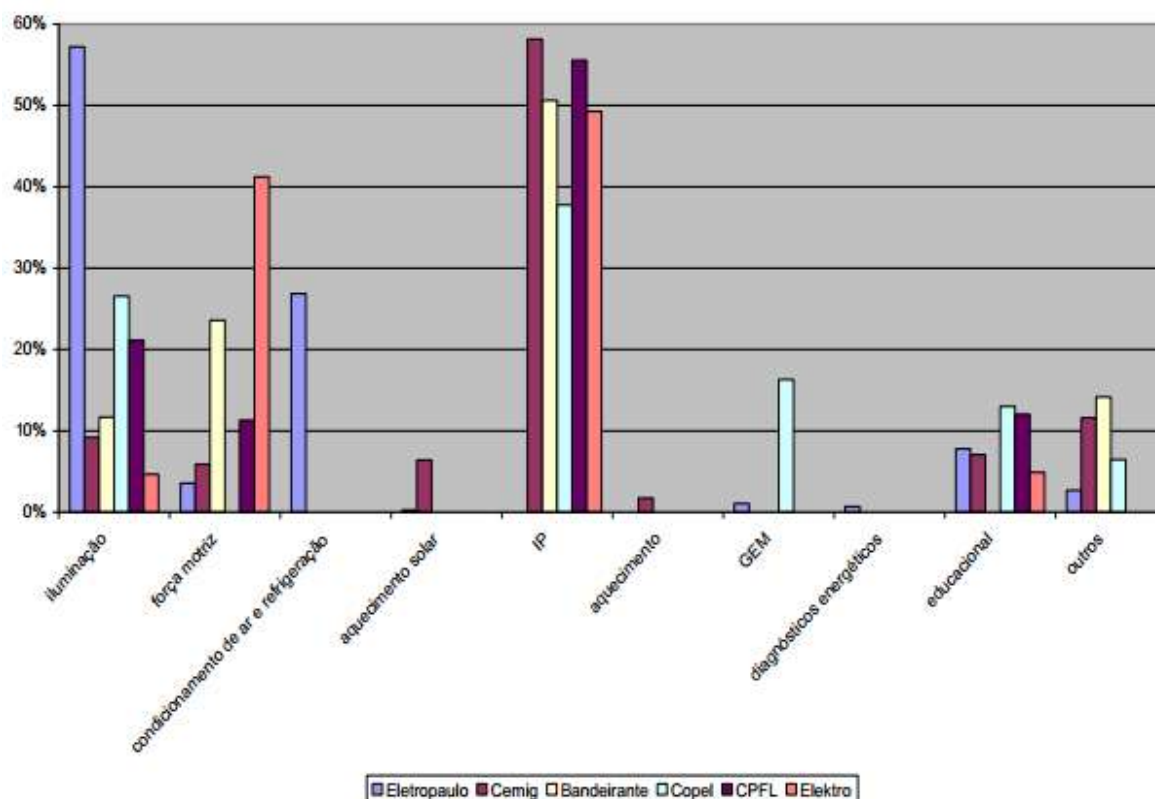
Por reconhecer a importância desse tema, o Governo Brasileiro criou em 24 de julho de 2000 a lei 9.991 de acordo com a qual as concessionárias e permissionárias do serviço público de distribuição são obrigadas a aplicar recursos com o objetivo de promover medidas que contribuam para a conservação e o combate do desperdício de energia elétrica. Com a resolução nº 394 de 17 de setembro de 2001, foram estabelecidos critérios para a aplicação desses recursos em Projetos de Eficiência Energética (PEE), que devem seguir o modelo proposto pelo Manual do Programa de Eficiência Energética (ANEEL, 2001). Uma dessas obrigações é a aplicação de no mínimo 0,5% de sua receita operacional nesses projetos.

A Lei Nº 13.280, publicada em 13 de maio de 2016 e regulamentada pela Resolução Normativa da ANEEL Nº 737 de 27 de setembro de 2016, determinou novos percentuais de aplicação dos seguintes programas até o final do ano de 2023: Programas de P&D (ANEEL 0,2%, FNDCT 0,2% e MME 0,1%) e de Eficiência Energética (ANEEL 0,4% e PROCEL 0,1%), e a partir do ano 2024 passará a ser: Programas de P&D (ANEEL 0,3%, FNDCT 0,3% e MME 0,15%) e de Eficiência Energética (ANEEL 0,2% e PROCEL 0,05%).

Dessa forma, as grandes distribuidoras de energia elétrica do Brasil têm investido em distintos projetos de eficiência energética, com recursos aplicados em

diferentes formas por distribuidora. Como pode ser visto no gráfico 1, existe uma grande concentração de recursos em iluminação pública, enquanto outras áreas possuem investimento nulo por algumas distribuidoras, como os de aquecimento, Gestão Energética Municipal (GEM) e diagnósticos energéticos [11].

Gráfico 1: Investimentos por usos finais e tipologias específicas de projeto



Fonte: Jannuzzi, 2007 [11].

Essa tendência é justificada pela falta de investimentos individuais das concessionárias em projetos de maior facilidade de execução e que considerem sua realidade. Assim, a iluminação pública leva uma vantagem por ter uma padronização de projetos, facilidades de Medida e Verificação e o rápido retorno de investimento.

Durante o ciclo de 2003/2004, a Eletropaulo investiu quase todo o recurso disponível para eficiência energética em iluminação e condicionamento de ar, conforme [11]. Na primeira etapa focou-se na substituição de lâmpadas incandescentes por fluorescentes compactas ou fluorescentes por outras de menores potências, troca de reatores e luminárias mais eficientes. Também houve o seccionamento de circuitos e a instalação de sensores de presença. Já os projetos de condicionamento de ar são bem específicos e dependem das particularidades de cada

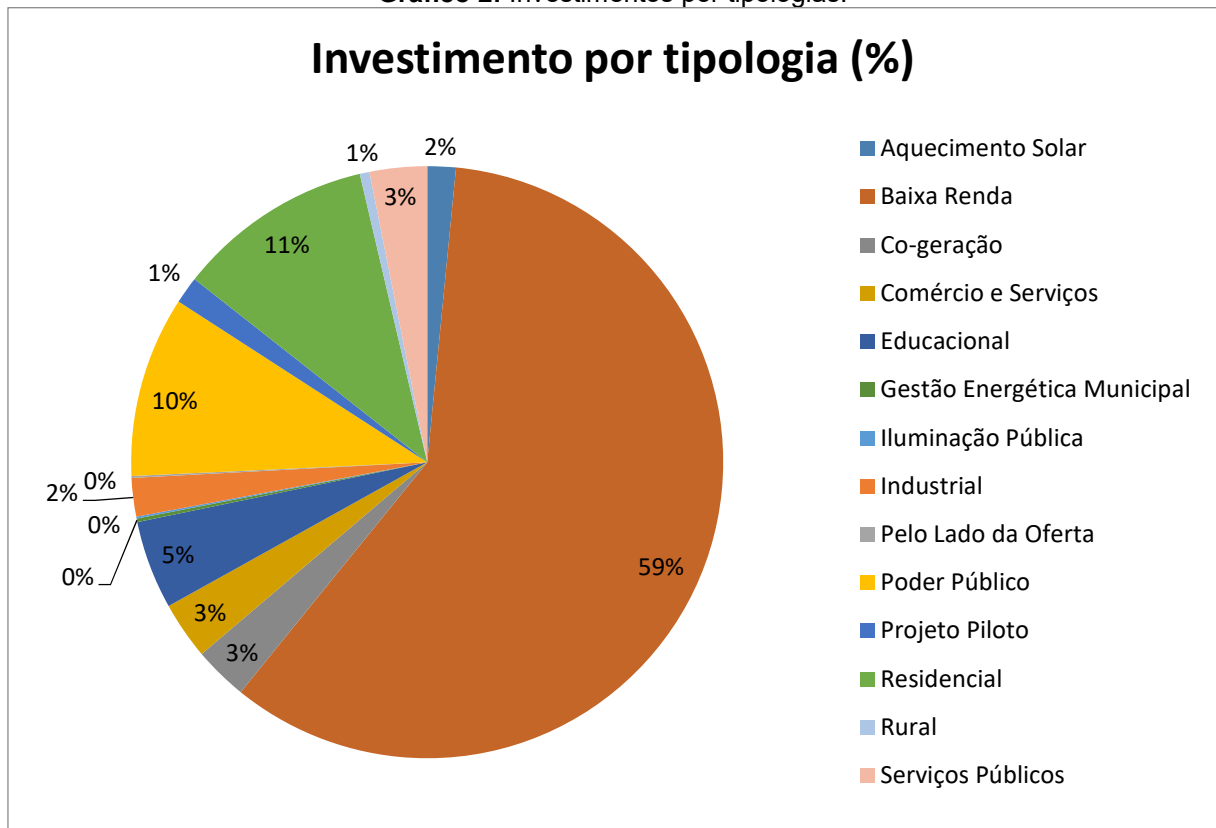
local. Esses projetos podem ser agrupados em dois tipos, os que tratam da substituição de equipamentos individuais e aqueles para sistemas centrais em grandes edifícios.

No mesmo ciclo, a CEMIG, diferentemente das demais concessionárias, apresentou vários projetos de aquecimento solar. Embora esse segmento apresente imenso potencial e enorme seja o impacto sobre a demanda na ponta, apenas a Eletropaulo apresentou um único planejamento nessa área [11].

No âmbito da educação, a CEMIG apresentou diversos programas educacionais em diferentes níveis, como na Educação Básica, Ensino Superior, Ensino Técnico e de Atualização e assim beneficiou toda a população devido ao envolvimento de projetistas e dos usuários na eficácia e longevidade dos projetos de eficiência energética. Uma peculiaridade da CEMIG é ter projetos de cogeração, os quais facilitam a interação com os agentes para sua elaboração e que costumam ser mais complexos que os normalmente realizados pelas distribuidoras [11].

Atualmente, as concessionárias de energia têm investido principalmente nas unidades consumidoras classificadas como de baixa renda e, como se pode constatar no gráfico 2, concentram 59% do investimento total dos projetos de PEE [12], cujo foco é a substituição de equipamentos ineficientes em residências de baixa renda, além de incluir ações educacionais, reformas nos padrões de entrada, regularização de ligações clandestinas, entre outras.

A CEMIG possui um subprograma de eficiência energética chamado Conviver, que tem como objetivo reduzir o consumo e a demanda de energia elétrica de famílias de baixa renda. Para isso são substituídos chuveiros, lâmpadas e geladeiras de alto consumo por outros mais eficientes, bem como a reforma de instalações elétricas e doação de padrões de medidores. Os resultados das três vertentes do projeto podem ser vistos na tabela 2 [13].

Gráfico 2: Investimentos por tipologias.

Fonte: ANEEL 2017 [12]

Tabela 2: Investimento total versus energia economizada por projeto.

Projeto	Público atendido	Investimento total (R\$ Milhões)	Energia economizada (MWh/ano)
Conviver	Clientes de baixa renda	29,8	69.800
Conviver Solar	Comunidades com baixo poder aquisitivo	4	562
Conviver Rural - Jaíba	Pequenos agricultores familiares	2,8	971

Fonte: Companhia Energética de Minas Gerais [13].

1.2 Objetivos

Esta pesquisa foi pensada a partir do contexto apresentado ao final da seção 1.1, com observação das lacunas em estudos já realizados sobre a temática e a relevância de se contribuir com a sustentabilidade do planeta. Para tanto, objetivou-

se idealizar, projetar, construir e realizar testes de um sistema de monitoramento de consumo elétrico residencial para medição e verificação em programas de eficiência energética para consumidores de baixa-renda, com vistas a fornecer uma alternativa de comunicação de dados de baixo custo para projetos que necessitem de vários dispositivos de aquisição e transmissão de dados sem a necessidade de retirá-los dos locais em que serão instalados.

1.3 Organização do texto

A continuidade deste trabalho foi dividida em mais cinco capítulos; os resultados apresentados foram organizados em três. O segundo, sobre a “Revisão bibliográfica”, apresenta os constructos teóricos e os estudos de pesquisadores que contribuíram para a análise dos dados. O terceiro capítulo apresenta como o sistema de medição e verificação para programas de eficiência energética foi pensado e proposto. Já no quarto capítulo, cada parte do sistema desenvolvido é descrita individualmente, com a definição dos módulos de medição de energia elétrica e do concentrador dos dados, dos *firmwares* de cada um desses módulos e do programa criado para fazer a interface com os usuários.

No quinto capítulo, são apresentados os resultados encontrados após a conclusão do sistema, assim como a comprovação de sua usabilidade em programas de eficiência energética a um baixo custo. No último capítulo são apresentadas as conclusões finais e os trabalhos futuros.

2 Revisão bibliográfica

Buscamos por meio da revisão bibliográfica compreender os referenciais teóricos existentes sobre sistema de monitoramento do consumo elétrico residencial usados para medição e verificação em programas de eficiência energética. Nesse sentido, verificamos que a bibliografia disponível até então, não apresenta com exatidão o perfil dos consumidores, o que de certa forma, não colabora para a tomada de decisões das concessionárias de energia em relação a seus projetos de conservação de energia.

2.1 Eficiência Energética e conservação de energia

A eficiência energética procura obter o melhor uso das fontes de energia. Hoje ela é reconhecida nos vários setores de atividade, tais quais o governamental, acadêmico e o empresarial, como um mecanismo de redução de custos e impacto ambiental e incentiva, inclusive, outras melhorias, como por exemplo a qualidade. É definida pela relação entre a quantidade de energia empregada em uma determinada atividade e por aquela disponibilizada para a sua realização. Para se obter a devida eficiência nesse setor faz-se necessária a otimização das transformações, do transporte e do uso dos recursos energéticos desde a geração até o consumo final.

Dentre as principais formas de energia, podem se destacar aquelas utilizadas pelos consumidores onde e quando necessárias, como a eletricidade, os diferentes combustíveis de automóveis, o gás natural, entre outros. Essa energia é utilizada em aparelhos de pouca complexidade, tais quais as lâmpadas e os motores elétricos e os sistemas mais complexos, como os automóveis, geladeiras e até uma fábrica e também é responsável por transformar outras formas de energia; porém, nesse processo parte dela é perdida para o meio ambiente, principalmente em forma de calor.

Dessa forma, pode-se avaliar a eficiência energética desde o uso inadequado dos aparelhos e sistemas até a diferença de energia gasta entre distintos sistemas

para a realização de um mesmo trabalho, ou seja, nessa avaliação é relevante considerar diferentes fatores e circunstâncias.

Os diversos equipamentos de uma residência, de um carro, de um escritório, a iluminação de parques e vias públicas e as centrais de distribuição e produção de energia consomem de alguma forma uma fonte de energia, seja a eletricidade, gás natural ou outras. Assim sendo, as concessionárias de energia e os governantes de diferentes esferas, como Federal, Estadual e Municipal têm investido em projetos e criado regras para melhorar a eficiência energética em todas as áreas de consumo. Por conseguinte, edifícios e condomínios energeticamente eficientes e novos processos industriais e de transporte poderiam contribuir para a redução das necessidades energéticas no futuro e também controlar as emissões de gases do efeito estufa, o que resultaria em garantia de sustentabilidade para o presente e garantiria um futuro melhor e mais promissor para a população.

Nos levantamentos realizados para esta pesquisa foi possível constatar que algumas medidas podem ser instituídas, consideradas como poupança de energia, para uma melhor eficiência energética, com resultados positivos caso sejam desenvolvidas ações que se revertem a médio e longo prazo para o desenvolvimento sustentável, tais como:

- Isolamento térmico de superfícies quentes;
- Substituição de dispositivos de iluminação por outros mais eficientes;
- Substituição de energia elétrica por energia solar em caso de aquecimento de água;
- Reaproveitamento de energia dissipada em insumo, como por exemplo o uso de energia térmica extraída em processo de aquecimento de ar como insumo para pré-aquecimento de água;
- Melhor aproveitamento da iluminação natural;
- Compensação do fator de potência;
- Implementação de sistemas de gestão de energia;
- Instalação de redes de sensores para visualização do uso de energia em cada ponto de consumo;
- Alteração nas tarifas cobradas, entre outros [14].

Outra solução que ultimamente tem sido apresentada e incentivada pelas concessionárias para atender o déficit energético é a contenção da demanda por meio de técnicas de conservação de energia, a partir da substituição dos sistemas de iluminação e de refrigeração, de máquinas, de motores, por outros de maior eficiência energética e menor custo financeiro e ambiental. Com esse objetivo, têm sido desenvolvidos projetos em fase de testes, sobretudo nos ambientes escolares.

Toda política energética deve estimular a eficiência e o combate ao desperdício por meio de instrumentos de regulação, como a melhoria de equipamentos para garantir o uso de novas tecnologias mais eficientes pelos fabricantes.

É fundamental a participação do setor público na implementação de programas de eficiência energética, tendo em vista a gama de argumentos favoráveis. Na tabela 3 é possível verificar as diferentes características que os programas públicos podem obter, assim como seus prováveis efeitos no mercado [15].

Tabela 3: Efeitos de alguns tipos de programas de eficiência energética promovidos pelo setor público

Tipos de atividade ou programa	Impactos econômicos	Proteção ambiental	Superação de falhas de mercado	Preservar e estimular ESCOs
Informação/educação/auditorias	Baixo	Baixo	Médio	Baixo
Incentivos financeiros	Alto	Alto	Baixo	Médio
Normas, padrões de eficiência energética	Curto prazo: baixo Longo prazo: alto	Médio	Alto	Baixo
Programas de transformação de mercado	Curto prazo: baixo Longo prazo: alto	Depende do programa	Alto	Alto inicialmente

Fonte: modificado de [15]

Em 1993 foi criado o selo Procel, com a finalidade de indicar ao consumidor quais aparelhos apresentam a melhor eficiência energética quando comparados aos similares de cada categoria. Dessa forma foi possível estimular a fabricação e comercialização de produtos mais eficientes por exigência dos consumidores finais, que passaram a exigir produtos com menor gasto energético, tais quais geladeiras, freezers, aparelhos de ar-condicionado, eletrodomésticos, entre outros considerados como de primeira necessidade para os consumidores [16].

Com esse selo, foi possível estimular toda a cadeia produtiva, do desenvolvimento até a comercialização, trazer benefícios diretos para o usuário, como

a redução de custos e a melhoria da competitividade devido a contribuição para o desenvolvimento tecnológico e para a redução dos impactos ambientais, com a utilização de menos recursos naturais e pela redução de gases de efeito estufa [16].

Investir em eficiência energética é uma oportunidade para o Brasil conseguir, simultaneamente, grandes benefícios econômicos e ambientais. O potencial economicamente viável para reduzir perdas de energia certamente é grande, apesar de os estudos para seu dimensionamento ainda estarem incipientes. Por exemplo, podem ser citados os prédios comerciais, onde é comum encontrar um conjunto de medidas com um retorno de investimento inferior a 3 anos que reduz a conta de energia em até 40% ou mais, sem prejudicar o conforto dos ocupantes [17].

Uma parte importante da demanda crescente para serviços energéticos - (como iluminação, força motriz, refrigeração, entre outras - pode ser “suprida” por medidas de eficiência com custos e investimentos menores que a expansão equivalente da oferta de energia. Resultam também em mais emprego, menos importações e impactos ambientais menores. Essas características trazem benefícios ao país como um todo [17].

2.2 Medição e Verificação (M&V)

A Medição e Verificação é um processo que faz o uso de medidas para determinar de modo seguro a economia real realizada em uma instalação individual em um determinado programa de gestão de energia. Devido ao fato de essa economia não poder ser feita diretamente, já que é representada pela ausência do consumo de energia, ela é determinada pela comparação do consumo medido antes e depois da implementação de um projeto de gestão de energia, com alterações pontuais, de acordo com aquelas realizadas nas condições encontradas [17].

Como não se pode gerenciar o que não se mede, é importante definir e negociar previamente as metodologias de medição e verificação de resultados entre as partes interessadas do projeto, tanto no diagnóstico inicial quanto após a efetivação das novas medidas de conservação de energia. Após a implementação de um projeto não é recomendável negociar novas definições em relação a M&V [17]. Com esse propósito, alguns países industrializados iniciaram um expressivo setor de prestação de serviços de conservação de energia. Com o crescimento desse setor, foi possível

implementar importantes inovações na comercialização dos serviços, alterar os métodos de financiamento e tipos de contrato, aprimorados para o tipo de desempenho garantido ou de risco e garantir aos prestadores de serviço uma remuneração pelos ganhos obtidos nos projetos por meio do nível de economia proporcionado [17].

Essas empresas são conhecidas como ESCOs (“Energy Service Companies”) em inglês ou como Empresas de Serviços de Conservação de Energia. A existência de procedimentos padronizados é de grande importância quando há contratos de desempenho garantido com as ESCOs ou quando há financiamentos envolvidos [17].

Essas empresas que investem em eficiência energética têm como objetivo principal saber quanto foi possível economizar e por quanto tempo perdurará essa economia. Caso uma instalação seja feita com o objetivo de gerar energia, basta instalar um medidor. Já no caso de consumidores de energia, a estimativa da economia resultante de uma medida de conservação de energia é complicada, principalmente na hora de fechar os contratos, devido à ausência do seu uso em relação ao padrão anterior à implementação dos projetos.

Entre as atividades de M&V, podem ser citadas algumas ações a serem realizadas ou não, de acordo com cada projeto, tais quais [18]:

- Instalação, calibração e manutenção dos medidores elétricos;
- Obtenção e tratamento dos dados;
- Desenvolvimento de métodos de cálculo e de estimativas aceitáveis;
- Cálculos com dados medidos;
- Geração de relatórios.

Toda proposta para um plano de medição deve ser baseada no EVO (Efficiency Valuation Organization), um documento criado em 1994 pelo Departamento de Energia dos EUA (Estados Unidos da América) com a finalidade de estabelecer um consenso internacional nos padrões que determinam os ganhos da eficiência energética. Atualmente, esse documento é utilizado por mais de quarenta países, e a partir de 1997, o INEE (Instituto Nacional de Eficiência Energética) tem traduzido e adaptado os textos para a língua portuguesa, com o apoio do PROCEL (Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica) e da USAID (Agência dos EUA para o Desenvolvimento Internacional) [19].

O EVO tem como objetivo desenvolver e promover o uso de protocolos normalizados, métodos e ferramentas para quantificar e gerir os riscos da performance e benefícios em relação às transações de negócios relacionadas com a eficiência energética nos usos finais da energia, energias renováveis e consumo eficiente de água [18].

Para atender os diferentes tipos de situações que ocorrem na prática, esse protocolo fornece apenas os conceitos e uma estrutura de ações que devem ser aplicadas em cada caso. Dessa forma o EVO não fornece métodos descritivos para se fazer M&V para cada tipo de situação no cálculo da eficiência energética, então é importante entender a variação do uso de energia em cada caso particular, por meio do desenvolvimento de métodos capazes de prever o consumo de energia para as novas condições após a aplicação das ações [18]. Ou seja, para cada caso é necessário elaborar um projeto de M&V o qual explicita o que vai ser medido e como será feito o cálculo da economia para todos os envolvidos nessa ação, seja o dono da instalação, as ESCOs, as distribuidoras de energia ou o agente regulador.

2.3 Pesquisa de Posses e Hábitos de Uso

A Pesquisa de Posses e Hábitos de Uso (PPH) é uma pesquisa declaratória que traça um perfil de posses e hábitos de consumo de equipamentos elétricos nos setores residencial, comercial e industrial, com o intuito de avaliar o mercado de eficiência energética em todas as regiões do Brasil [20]. A PPH é basicamente uma auditoria de todos os equipamentos elétricos do consumidor.

Essas informações têm sido utilizadas principalmente pelas distribuidoras de energia elétrica e pelo MME com o intuito de conhecer o perfil dos consumidores brasileiros e tornar possível o desenvolvimento de melhores estratégias de investimento em eficiência energética, de gestão de projetos para atender as demandas e para o estabelecimento de uma política energética [21].

2.3.1 – Breve Histórico

A primeira pesquisa quantitativa de campo denominada “Pesquisa de Posse de Eletrodomésticos e Hábitos de Consumo - PPH” foi realizada na classe residencial e em âmbito nacional em 1988 e teve a coordenação da Eletrobrás por meio do Procel. Ela foi feita em 291 municípios de 23 estados mais o distrito federal, com 10.818 consumidores e participação de 27 concessionárias de todas as regiões do país [20], [22].

A segunda pesquisa foi realizada entre os anos 1997 e 1998, coordenada pela Eletrobrás, por intermédio do Procel e executada pela Puc-Rio, também no segmento residencial em 15 estados e o Distrito Federal. A pesquisa contou com 15.870 entrevistados e 20 concessionárias. Com essa pesquisa foi possível desenvolver uma metodologia aplicada aos consumidores residenciais e comerciais que fazem uso da baixa tensão para apurar as posses e hábitos de uso de equipamentos. A Light e a Celpe em 1999 e a Elektro em 2000 também realizaram essa modalidade de pesquisa [23].

Entre os anos de 2004 e 2006, tal metodologia foi utilizada em uma nova pesquisa com a mesma coordenação e execução da anterior, mas com um escopo mais amplo, para abranger os seguintes segmentos de consumo: residencial, comercial/industrial de baixa tensão, comercial/industrial de alta tensão e poderes públicos de alta tensão. Essa pesquisa foi aplicada em 17 estados e o Distrito Federal e contou com a participação de 21 concessionárias e atingiu 92% do mercado consumidor de energia elétrica do Brasil [23].

O principal objetivo da pesquisa foi quantificar a tipologia de posse e obter um relatório do tempo em que cada equipamento elétrico foi utilizado por meio da aplicação de um questionário em campo para coleta de informações. A partir desses dados foi possível gerar um relatório chamado “Avaliação do Mercado de Eficiência Energética no Brasil – Pesquisa de Posses de Equipamentos e Hábitos de Uso” [22].

A resolução número 395, de 15 de dezembro de 2009, lançada pela Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel), obrigou as concessionárias de energia elétrica a apresentarem uma PPH a cada dois ciclos de revisão tarifária periódica para as diversas classes de unidades consumidoras.

Com o intuito de facilitar a exploração dos dados das pesquisas realizadas em 1997 e 2005, foi desenvolvido o SINPHA (Sistema de Informação de Posses e Hábitos de uso de Aparelhos Elétricos), cuja finalidade é apresentar os indicadores do segmento residencial de baixa tensão obtidos a partir dos dados das Pesquisas de Posses e Hábitos de Consumo de Energia dos anos 1997 e 2004-2006, possibilitando o cruzamento de dados relacionados ao mercado de eficiência energética, a realização de simulações da curva de carga e o acesso de forma eficaz dos dados [24].

2.3.2 – Tipos de Pesquisa

As pesquisas de mercado possibilitam a dedução sobre a quantidade ou proporções populacionais de interesse por meio de uma determinada quantidade de amostras que representam essa população. Elas podem ser divididas em dois tipos: qualitativas ou quantitativas.

As amostras qualitativas são de natureza exploratória, sem representatividade estatística e não permitem as estimativas populacionais. A aplicação do instrumento de coleta de dados é feita por meio de grupos de foco ou entrevista individual [25].

Já as amostras quantitativas têm como fundamento um processo de medição, seguem critérios matemáticos rígidos cujas amostras possuem representatividade estatística. Nesse tipo de pesquisa se destacam as do tipo Tracking, que apresenta variação nas amostras e as do tipo Painel, cuja amostra é a mesma [25] .

A PPH, como já dito anteriormente, é realizada de forma quantitativa, na modalidade Tracking, já que é aplicado um formulário de nove páginas nos padrões de PPHs da PUC/PROCEL para o segmento de baixa tensão. Esse formulário tem como objetivo identificar e caracterizar o domicílio, fazer o levantamento de posses de todos os equipamentos elétricos do domicílio, levantar os hábitos de consumo dos principais aparelhos elétricos e fazer uma caracterização socioeconômica e comportamental [25].

Assim, a PPH fornece informações de cada equipamento, como marca, modelo e potência dos aparelhos bem como o seu hábito de uso. Caso não seja possível obter

a potência do aparelho, o pesquisador coleta as informações básicas a seu respeito, como a idade e características e, dessa forma, é possível adequar a potência do aparelho com tabelas fornecidas pelo INMETRO/PROCEL [25].

2.4 Técnicas de medição de energia elétrica para eficiência energética

Para a realização do processo de Medida e Verificação, faz-se necessária a obtenção de medidas em um determinado tempo antes e depois das medidas de eficiência energéticas, realizadas por um sistema de medição de energia que processa as informações obtidas e apresente o resultado de forma estruturada. Esse sistema deve realizar várias medições por dia, em intervalos de tempo.

Entre as várias topologias de sistema de medição disponíveis para M&V, destacam-se: a leitura de múltiplos medidores centralizada em um computador, a leitura de múltiplos medidores centralizada em um concentrador e a tomada de leituras por medidores com memória de massa [26].

2.4.1 Leitura centralizada em um computador

Essa topologia consiste em um computador com um *software* de leitura e gerenciamento dos medidores por meio de uma rede cabeada, registro das informações de consumo em um banco de dados integrado para posterior análise. A leitura eletrônica dos dados é feita de forma contínua por cada medidor e os dados são transferidos para um computador, como visto na Figura 1, que processa as informações e apresenta os resultados de consumo no final do processo de M&V.

Entre as fragilidades desse sistema está a dependência de um computador, que pode travar as leituras dos medidores seja por parte dos usuários, falta de energia, entre outros problemas, os quais podem causar perda de dados. E por se tratar de uma rede cabeada, desenvolvida para trabalhar em um sistema de comunicação ponto a ponto, não há como fazer a leitura do consumo de energia simultaneamente dos medidores. Dessa forma, as medidas de consumo energético instantâneas são consideradas constantes durante o período entre leituras e podem gerar erros

consideráveis no cálculo da energia consumida [26]. Quando ocorrem tais falhas, uma ação de contingenciamento se torna impossível e causa perda total na confiabilidade da medição, que apresentará imprecisão.

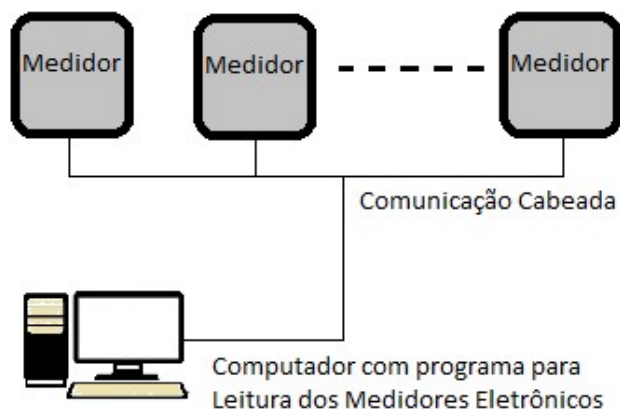


Figura 1: Esquema de medição centralizado em um computador

Fonte: o autor (2017).

Um sistema de monitoramento de energia elétrica similar a essa topologia é mostrado por [27], que utiliza o protocolo de rede TCP/IP e um roteador para interligação dos dispositivos de rede.

2.4.2 Leitura centralizada em um concentrador de dados

Nesta topologia é utilizado um concentrador de medidas que realiza a leitura eletrônica dos medidores por meio de uma rede cabeada e armazena os dados em uma memória interna. Ao final do processo de M&V, essas informações passam pelo *software* de gerenciamento, responsável por processar as informações e emitir os relatórios de consumo de energia elétrica, como pode ser visto na Fig. 2.

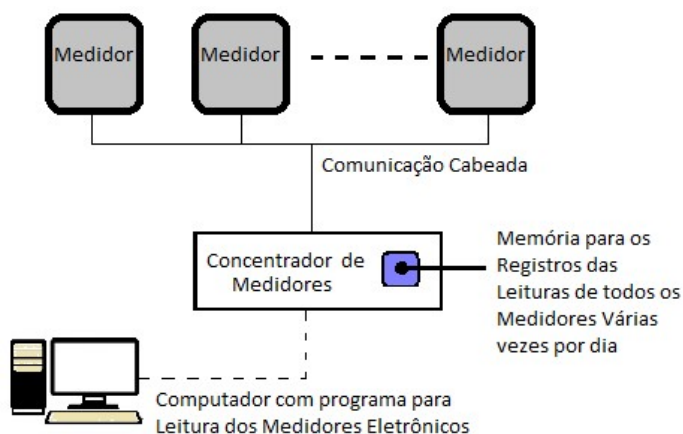


Figura 2: Esquema de medição com concentrador de dados

Fonte: o autor (2017).

Esse sistema geralmente é aplicado em condomínios, onde os medidores são conectados através de uma rede comum conectada a um computador responsável pela leitura, armazenamento e envio dos dados para um servidor da companhia de distribuição por uma rede interna privada ou pela internet [28].

Entretanto, uma eventual falha no concentrador, como as citadas anteriormente, poderá ocasionar a perda de todos os dados obtidos, bem como uma falha em um dos medidores que poderá ocasionar uma obstrução de leitura dos demais medidores. A dependência de uma rede comum e de internet também são fatores negativos.

2.4.3 Medidores com memória de massa

Essa topologia utiliza-se de medidores eletrônicos com memória para a realização das medidas de consumo energético, as quais são armazenadas na memória de massa dos medidores de forma sequencial, e ao encerrar as medições em um determinado período, as novas informações são salvas sequencialmente no lugar das primeiras. Dessa maneira, se qualquer eventual falha na porta de comunicação de um dos medidores impedir a leitura dos demais, poderá ser corrigida após o tempo determinado, sem que haja perda de dados no período desejado.

Após adquirir todas as medições necessárias para realização do processo de M&V, as informações são transferidas para uma unidade de processamento através de uma rede cabeada ou sem fio para uma unidade de processamento, como um computador, para analisar todos os dados dos medidores e em seguida processá-los, apresentar um relatório final para as distribuidoras de energia e para os consumidores.

Nessa configuração, é desnecessário possuir um concentrador de medidas; basta haver os medidores eletrônicos de energia com um sistema de comunicação e memória de massa para leitura dos dados e de um computador com o *software* de gerenciamento de energia, conforme demonstrado na Fig. 3.

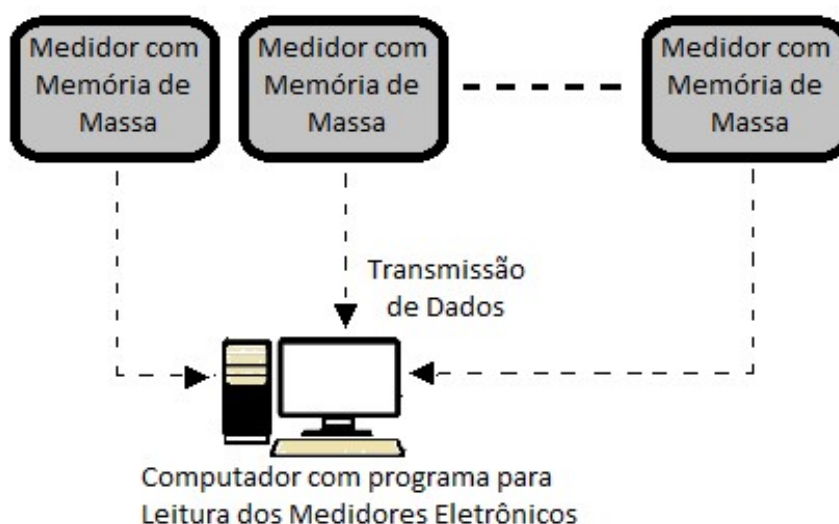


Figura 3: Esquema de medição com medidores dotados com memória de massa
Fonte: o autor (2017).

Com o uso dessa configuração, caso um medidor apresente falha, apenas os dados adquiridos por ele serão perdidos, enquanto nas outras configurações, se o concentrador ou computador central falharem, os dados de todos os medidores serão perdidos. Dessa forma, essa topologia possui maior robustez do que as apresentadas anteriormente.

Existem dispositivos de monitoramento do consumo elétrico, como por exemplo o Plogg, que faz as medições elétricas e depois envia os dados por redes de comunicação Bluetooth ou Zigbee [29].

2.4.4 Sistema Proposto

A arquitetura escolhida para o medidor de energia foi pensada para cumprir os pré-requisitos iniciais do projeto: ser de baixo custo, possuir alto grau de confiabilidade e possuir uma facilidade para a leitura e compreensão dos dados pelos usuários finais. Assim, optou-se por um sistema dotado com medidores com memória de massa.

Dessa forma, o sistema desenvolvido foi composto por dois diferentes tipos de dispositivos, ou seja, um conjunto de medidores de energia elétrica e um concentrador de medidas. Entretanto, ao contrário do que acontece na topologia de “leitura centralizada em um concentrador de dados”, não há a necessidade de uma rede permanente que conecte o concentrador aos medidores. No sistema proposto, tanto

os medidores quanto o concentrador possuem memória de massa e um sistema de comunicação ponto a ponto infravermelho, que é acionado pelo concentrador para a realização das leituras dos dados. Esse sistema pode ser visualizado na figura 4.

Os medidores de energia têm como função obter o consumo de energia das cargas monitoradas e armazená-las em um cartão de memória. Após um período de monitoramento da carga, os dados são transferidos para o concentrador de medidas através de comunicação infravermelho, e assim concatenar em apenas um cartão de memória, todos os dados, os quais serão posteriormente transferidos para um computador responsável por analisá-los através de um *software* desenvolvido em LabVIEW.

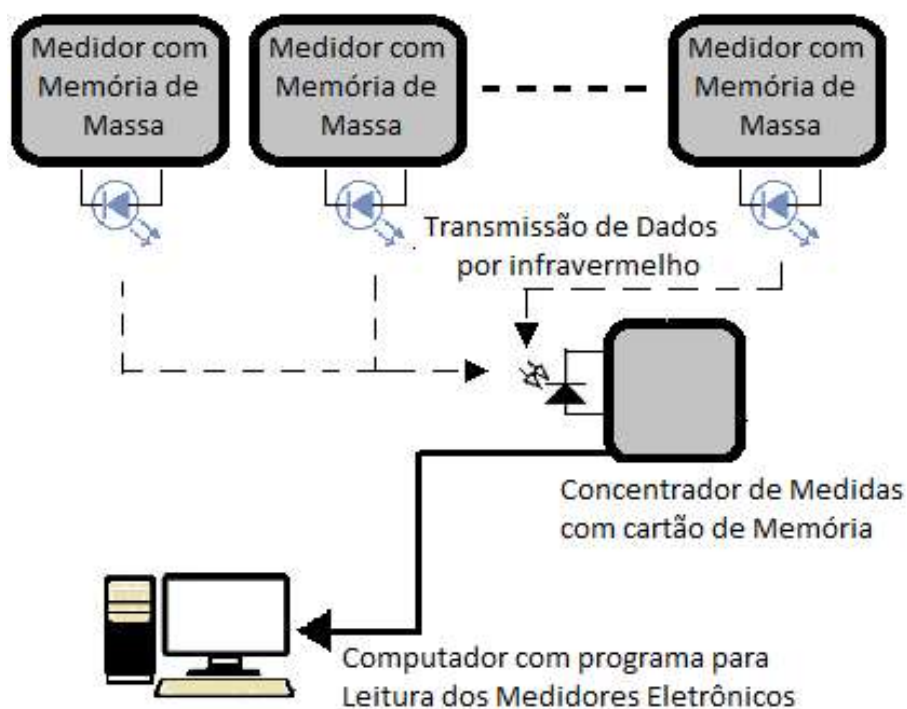


Figura 4: Arquitetura selecionada com medidores dotados com memória de massa e infravermelho
Fonte: o autor (2017).

Como vantagens desta arquitetura proposta, pode-se citar a redução de custo de fabricação, pelo fato de utilizar um sistema de comunicação bem conhecido e com componentes eletrônicos mais baratos, mesmo não sendo uma rede cabeada e por possuir a capacidade de evitar a perda de dados, já que todos os dispositivos do sistema possuem memória de massa removível. Outro ponto positivo é o baixo consumo de energia, principalmente por não haver a necessidade de transmitir constantemente os dados.

2.5- Estudo de Caso

As concessionárias de energia têm investido em projetos de conservação de energia, dentre os quais, os identificadores de locais de maiores consumos em uma residência [30]. E com a universalização do serviço de energia elétrica no Brasil, financiada pelo programa denominado 'Luz para Todos', do governo federal, boa parte da população brasileira passou a comprar mais eletrodomésticos, seja devido à ascensão social ou pelos incentivos do governo como o Programa 'Minha Casa Melhor' [31]. Com isso a demanda residencial por energia tem aumentado e as concessionárias de energia são obrigadas a investir em programas de eficiência energética, estimulando o uso racional de energia para evitar os desperdícios no uso diário de uma residência, como, por exemplo, em ambientes iluminados sem a presença de ninguém e do aquecimento/resfriamento de ambientes sem um controle inteligente e sem um uso racional.

Para evitar algumas perdas de energia é necessário conhecer os hábitos de consumo dos consumidores, que é feito normalmente através das PPHs. Como alternativa, existem projetos cujo objetivo é fazer uma avaliação mais precisa através de um sistema capaz de mapear o consumo real de uma residência ou comércio e de cada um dos seus aparelhos elétricos.

O conceito de redes elétricas inteligentes cujas contribuições são a melhora da sua utilização, redução da demanda e do uso extensivo de fontes de energia renovável é aceito em todo o mundo [32]. A proposta dessa modalidade é realizar a instalação de uma infraestrutura de medição avançada (AMI, em inglês) em residências para possibilitar a sua obtenção. Para isso foi usado um medidor inteligente de carga com um sistema de comunicação ZigBee e de um *software* de configuração e armazenamento instalado em um computador com um adaptador ZigBee. No medidor inteligente de energia foi utilizado um microcontrolador DSPIC30F da Microchip para a realização das medições e cálculos, além do módulo de comunicação Zigbee. Entre suas funções pode-se citar a medição de grandezas elétricas em tempo real, o cálculo de energia e a transmissão desses dados [32].

O Centro Técnico e Científico da PUC-Rio (CTC-PUC-Rio) desenvolveu um sistema capaz de tornar mais precisa a avaliação do consumo real de uma residência

e de cada um dos equipamentos eletrônicos. Esse sistema consiste em medidores e tomadas “inteligentes” que verificam o consumo de cada equipamento a cada 15 minutos. As informações obtidas são armazenadas em uma memória e posteriormente são descarregadas em um computador. Atualmente esse medidor está sendo utilizado nas áreas de atuação da Coelce, no Ceará e na da Ampla, no Rio de Janeiro, ambas pertencentes à Endesa Brasil, para efeito de comparação com as PPHs. Os dados retirados do medidor são consolidados para comparação com os dados obtidos pela PPH e ajudam a criar coeficientes de ajustes da curva de carga de consumo, segundo [33]. Entre as especificações do projeto, pode-se citar:

- Corrente máxima de 10 amperes para uso de tomadas;
- Tensão de 100 a 240 Volts de entrada;
- Memória de massa para a criação de logs com a capacidade de armazenamento de 2 meses;
- Conexão USB para configuração;
- Leds indicativos para conexão USB, ligado/desligado e auxiliar.

Outras universidades têm investido em projetos de um micromedidor inteligente de energia, de baixo custo de fabricação, tamanho reduzido e dotado de um canal de comunicação com um medidor central ou com um controlador central de cargas. Sua finalidade é medir o consumo individual de cada carga de uma residência e possibilitar o corte de carga via comando remoto, agendamento ou sobrecarga.

Na Universidade Federal do Paraná há projetos que desenvolveram micromedidores inteligentes para adaptar à necessidade do projeto. Segundo [34], foi desenvolvido um micromedidor inteligente com a finalidade de medir potência, com baixo consumo de energia, baixo custo, dotado de um controle para ligar e desligar o dispositivo e trabalhar de forma integrada a uma rede elétrica inteligente. Nele foi utilizado um microcontrolador MSP430FE4272 da Texas Instruments que comanda as principais funções da placa e um microcontrolador 8051 integrado no módulo de comunicação ZigBee (Fig. 5). O primeiro tem a função de controlar o relé, fazer a leitura da chave e o controle da comunicação serial. Já o segundo microcontrolador tem a função de enviar mensagens de início de operação, receber requisições de medições via rede, requisitar e receber medidas para o MSP430 e voltar a transmiti-las para a rede. [34].

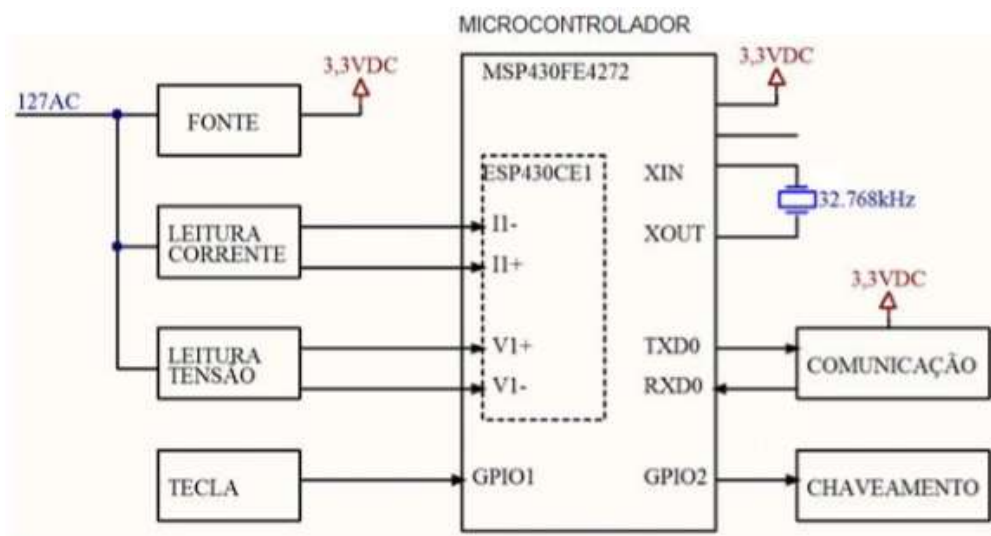


Figura 5: Diagrama em blocos smart plug
Fonte: [34]

Existem no mercado vários microcontroladores inteligentes que utilizam os sistemas de comunicação ZigBee, Bluetooth ou Wi-Fi, porém muitos deles não possuem uma documentação apropriada com informações a respeito da capacidade de realizar modificações nesses aparelhos ou em seus *softwares* no intuito de, com eles, desenvolver novos projetos com ou sem adaptações. Outro empecilho apresentado é a dificuldade de importação encontrada por parte dos fabricantes.

Conforme uma pesquisa realizada pelo pesquisador em junho de 2017 e com a utilização de alguns dados de [34], foi confeccionada uma tabela com as principais informações de alguns micromedidores inteligentes disponíveis no mercado, apresentados na tabela 4.

Tabela 4: Micromedidores inteligentes de energia disponíveis no mercado

Marca / Modelo	Foto	Comunicação	Monitora	Preço
TP-LINK / HS110		Wifi	Corrente, Potência e demanda	R\$ 199,00
Belkin / WeMo Switch		Wifi	Tensão, potência e demanda	\$49,99

SafePlug / 1203		ZigBee	Tensão, potência e demanda	\$95
Smartenit / ZOE-MP1		ZigBee	Tensão, potência e demanda	\$79.99
Alertme / Alertme		WiFi	Tensão, potência e demanda	£25
Ecobee / Smart Plug		ZigBee	Demanda	\$49
Stick-NFind / Meter Plug		Bluetooth	Valor gasto em moeda	\$49,99
HAI / Plug In		ZigBee	Tensão, potência e demanda	\$195,8
Schneider Electric / Wiser SmartPlug		ZigBee	Tensão, potência e demanda	\$112,99
ThinkEco / Modlet		ZigBee	Tensão, potência e demanda	\$45
Digi XBee Smart plug		ZigBee	Tensão, potência e demanda	\$84

Fonte: modificado de [35]

Ao verificar a tabela 4, pode-se notar que todos os micromedidores encontrados utilizam a rádio frequência para realizar a comunicação, o que eleva seus custos.

Como uma opção de projeto para o Departamento de Semicondutores, Instrumentos e Fotônica (DSIF) da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), que possui projetos de medidores com a utilização de outros meios de transmissão de dados mais caros, como por exemplo, com o uso da tecnologia Wi-Fi [35] ou ZigBee [36], foi proposto um dispositivo capaz de efetuar medições em cada equipamento elétrico de uma residência, de fácil instalação, baixo consumo e baixo custo, apto a transmitir os dados coletados para outro dispositivo receptor, ambos dotados de tecnologia infravermelha que já é bem difundida e possui um custo bem menor se comparada às demais formas de transmissão de dados.

2.5.1 Smart Plug TP-LINK HS100

Para fins de comparação, foi selecionado o smart plug da TP-LINK, modelo HS100, apresentado na figura 6, que possui a opção de analisar o consumo de energia em tempo real e o consumo de energia elétrica. Entre outras características nele presentes pode-se citar o acesso remoto, que controla os aparelhos conectados no smart plug pela internet e por um aplicativo gratuito, o Kasa. Também é possível fazer programação de horários no smart plug para ligar ou desligar os aparelhos nele conectado.

Para se conectar na internet, o smart plug exige o protocolo IEEE 802.11b/g/n, com uma frequência de 2,4GHz e um aparelho celular com os sistemas operacionais Android 4.1 ou o IOS 8 ou superiores. Possui também tensões de entrada e saída de 100 a 240 Volts, com uma corrente máxima de 16 Amperes e Potência Máxima de 3,68 Kw. E para a realização dos testes finais, algumas cargas residenciais foram ligadas ao dispositivo desenvolvido, o qual foi posteriormente conectado em série com o smart plug da TP-LINK.



Figura 6: Medidor TP-LINK HS100
Fonte: material elaborado pelo autor.

3 Metodologia de Pesquisa

Esta pesquisa foi realizada a partir de um ciclo, em que houve o início, com a definição do tema, problematização e levantamento bibliográfico, momento em que foi possível identificar as lacunas em estudos sobre a temática. Na sequência desse ciclo, foi realizada a seleção e a revisão do material bibliográfico. Em seguida, definiu-se pela organização do estudo em três partes: medição de energia elétrica, armazenamento e transmissão de dados entre os dispositivos e o desenvolvimento de uma interface para os usuários finais.

Ainda com um olhar para o ciclo metodológico, na análise do material, identificou-se que um medidor de energia elétrica é um aparelho eletromecânico e/ou eletrônico capaz de mensurar o consumo de energia de uma carga. Ele pode ser inserido entre a rede de energia elétrica e a carga a ser medida ou através de transformadores de acoplamento de tensão e/ou corrente. A unidade de medida mais utilizada é o quilowatts-hora (kWh), que indica o consumo por unidade de tempo [37]. Para a fabricação do sistema de medição, foi utilizado um transformador responsável pela medição da tensão e de um transformador de corrente JSCT-6 [38] para as medidas de corrente.

Outro dispositivo similar ao proposto acima, com o diferencial de não possuir a parte de aquisição de dados e possuir uma alimentação com o uso de baterias, é responsável por receber as informações dos medidores de energia por infravermelho e repassá-las via um cartão de memória SD para um PC que irá transformar esses dados em informações úteis para o usuário final.

Deve-se considerar que para o sistema de armazenamento de dados foi utilizado um cartão de memória SD de 2GB, da Sony. Esse tipo de memória foi escolhido por ser de baixo custo, já que é utilizado em praticamente todos os dispositivos portáteis atuais que necessitam de memória de massa. Todo o processamento das informações foi realizado com a utilização de um microcontrolador da Texas Instruments, o MSP430F6736 [39], o qual possui três conversores analógico-digital do tipo Sigma-Delta de 24-bits e quatro interfaces de comunicação serial, além de ter uma configuração de baixíssimo consumo [40].

Já o sistema de transmissão de dados foi desenvolvido baseado no receptor de comunicação por infravermelho IRM-8651 [41], responsável por demodular os

sinais enviados por meio de um LED infravermelho. Essa tecnologia foi selecionada principalmente pelo baixo custo em relação a outros meios de comunicação e por ser uma tecnologia bem conhecida.

A interface para os usuários foi desenvolvida com a utilização do *software* LabVIEW, por possuir uma programação gráfica, que torna simples a visualização, a criação e a codificação da interface. Já em relação aos usuários, será necessária apenas a inserção dos dados recolhidos pelos medidores para o sistema gerar os dados de consumo de energia elétrica.

4 Módulo Medidor de Energia Elétrica

O módulo medidor de energia apresentado neste capítulo tem como finalidade medir as tensões e correntes eficazes de cada aparelho elétrico de uma residência, com a finalidade de calcular principalmente a potência ativa e também a potência aparente e o fator de potência em um determinado período de tempo definido pelo usuário final, responsável por conectar o dispositivo projetado em cada ponto de consumo de energia até o momento da coleta de dados realizado através da retirada do cartão de memória SD presente no dispositivo.

Um concentrador de medidas foi desenvolvido para facilitar a retirada dos dados de cada medidor. Com o uso da comunicação infravermelha, esses dados são concentrados em apenas um cartão de memória e assim é possível obter os mesmos dados citados acima de uma forma mais eficaz, sem a necessidade de retirar o cartão de memória de cada medidor e também de evitar a inserção de vários cartões de memória no computador.

Por meio dessas informações salvas no cartão de memória a cada minuto e a cada quinze minutos, é possível fazer o uso do programa desenvolvido em LabVIEW, onde será possível verificar esses valores, e também calcular a quantidade de energia utilizada, bem como o seu custo para o usuário final para cada dispositivo. Ao final, é gerado um relatório com os gastos do consumidor em toda a residência.

4.1 Módulo Medidor

O dispositivo foi projetado para medir a tensão da rede de energia elétrica e a corrente no circuito, tendo seu esquema elétrico apresentado nos apêndices A e B. Composto pelos módulos medidor, de comunicação infravermelha, de processamento e de armazenamento, seu protótipo é apresentado na figura 7.

O módulo medidor utiliza-se de dois transformadores de tensão com entrada nominal de 110/220 V_{rms} e saída de 8 V_{rms} com a finalidade de proteger o circuito do medidor, para isolamento elétrico e para atenuar os sinais de entrada. O primeiro transformador é responsável por alimentar todo o circuito desenvolvido com o auxílio

de um retificador de onda completa com capacitor de filtro e de dois reguladores de tensão, um de 5 Volts e outro de 3,3 Volts. Posteriormente são adicionados dois ferrite beads nos caminhos de alimentação para isolamento dos ruídos do circuito analógico em relação ao digital.



Figura 7: Medidor de energia elétrica desenvolvido
Fonte: material elaborado pelo autor.

O segundo transformador, responsável pelo sinal que será efetuado na medida de tensão, tem suas amplitudes atenuadas por um divisor resistivo composto por resistores de $24\text{ k}\Omega$ e $1\text{ k}\Omega$, com a finalidade de adequar esse sinal à entrada do conversor AD do microcontrolador, que possui fundo de escala de $\pm 1,15\text{ V}$. Depois o sinal passa por um filtro anti-aliasing composto por circuitos RC passa-baixas compostos por resistores $R2$ e $R4 = 1\text{ k}\Omega$ e de capacitores $C8$ e $C9 = 33\text{ nF}$, com frequência de corte de $4,8\text{ kHz}$.

Para se obter o sinal de corrente, foi utilizado um transformador de corrente cuja relação de entrada/saída é de $5\text{ A}/5\text{ mA}$, com precisão de $0,1\%$ e corrente máxima de 20 A_{RMS} . O transformador foi instalado bem na entrada do medidor e faz o uso de um resistor de borda $R7 = 10\text{ }\Omega$ para medir a corrente induzida no TC. Com o uso do conversor A/D Sigma-Delta de 24 bits é possível medir correntes de até 20 A_{RMS} com resolução de $2,38\text{ }\mu\text{A}_{\text{RMS}}$. Um filtro anti-aliasing composto por circuitos RC passa-baixas compostos por resistores $R5$ e $R6 = 1\text{ k}\Omega$ e capacitores $C10$ e $C11 = 33\text{ nF}$

também foi inserido antes da entrada do conversor, com frequência de corte de 4,8kHz.

O microcontrolador MSP430F6736 da Texas Instruments foi escolhido para implementar o medidor elétrico por ser de baixo custo e um baixo consumo de energia. Ele contém uma unidade de processamento RISC de 16 bits que opera com uma frequência máxima de até 25 MHz, uma memória não volátil de 128 KB, uma memória RAM de 8 KB, interfaces de comunicação I2C, SPI e UART, timers de 16 bits, 72 pinos de propósitos gerais, 3 conversores Sigma-Delta independentes de 24 bits e 6 canais de conversores A/D [40].

Os conversores Sigma-Delta de 24 bits de resolução possuem entradas diferenciáveis sincronizáveis que permitem amostragens simultâneas e podem operar com uma taxa de sobreamostragem de até 1024 vezes. No medidor de energia foram utilizados dois conversores A/D Sigma Delta independentes para a amostragem simultânea dos sinais de tensão e corrente oriundos dos transformadores, que é uma exigência para o correto cálculo da potência ativa. Eles foram configurados para operarem com todos os 24 bits de resolução, entradas diferenciais bipolares, com fundo de escala em $\pm 600\text{mV}$ e ganho unitário, com uma taxa de sobreamostragem de 256 vezes e uma taxa efetiva de 4096 amostras por segundo [39].

Sabe-se que para uma boa precisão nas medidas de tensão e corrente, é necessário realizar a calibração do medidor. Para realizar a compensação de fase causada pelo transformador de corrente, houve a necessidade de realizar um atraso de $3,76^\circ$ de defasagem entre os sinais de tensão e corrente. Esse valor foi inserido em um dos registradores do microcontrolador e foi encontrado por meio do cálculo da fase das componentes harmônicas com a utilização da equação 1:

$$\angle I[k] = \arctang\left(\frac{\text{Im}\{I[k]\}}{\text{Re}\{I[k]\}}\right) \quad (1)$$

k é o índice do componente harmônico do sinal de corrente no domínio da frequência discreta, $\angle I[k]$ é a fase do k -ésimo componente harmônico do sinal de corrente, $\text{Re}\{I[k]\}$ e $\text{Im}\{I[k]\}$ são as partes reais e imaginárias do k -ésimo componente harmônico do sinal de corrente calculadas pelas equações 2 e 3 respectivamente [42].

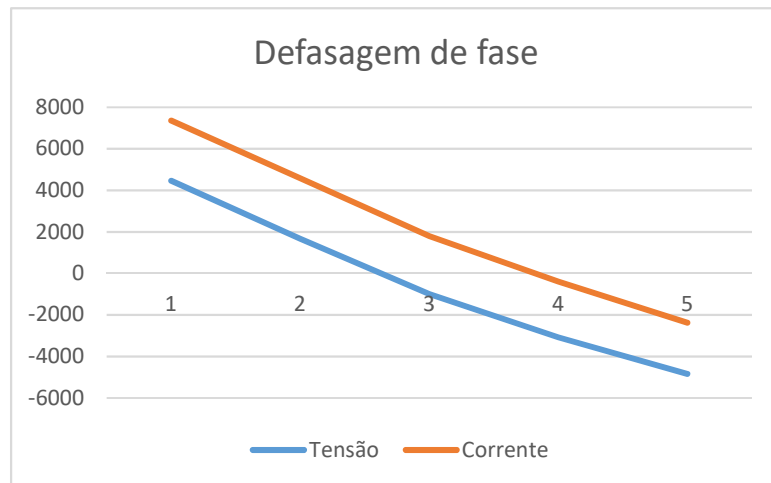
$$\text{Re}\{I[k]\} = \sum_{n=1}^N i[n] * \cos\left(\frac{2\pi kn}{N}\right) \quad (2)$$

$$\text{Im}\{I[k]\} = \sum_{n=1}^N i[n] * \text{sen}\left(\frac{2\pi kn}{N}\right) \quad (3)$$

Nessa equação, n é o índice da amostra de corrente no domínio do tempo discreto, N é o número de amostras e $i[n]$ é a n -ésima amostra do sinal de corrente no domínio do tempo discreto [42].

Para realizar a calibração do medidor, foi inserida em sua saída uma lâmpada incandescente de 150 Watts e assim foi possível realizar 340 medições equivalentes a 5 ciclos de rede. Por meio do programa Excel, foi criada uma tabela com os valores de tensão e de corrente obtidos pelo microcontrolador. Posteriormente essas medidas foram adicionadas nos cálculos das equações 1, 2 e 3, onde foi possível calcular um atraso de aproximadamente 0,065619 radianos ou 3,76° (equivalente a 188 no registrador). Ao colocar as medidas em forma de gráfico, é possível observar esse atraso, como pode ser conferido no gráfico 3, onde o eixo y representa os valores de tensão e de corrente obtidas nos registradores do microcontrolador e o eixo x o contador do número de medidas selecionadas para exibir o momento em que ocorre a inversão da polaridade dos sinais de corrente e de tensão.

Gráfico 3: Defasagem de fase



Fonte: material elaborado pelo autor.

Outro dado necessário para obter os valores exatos das medidas da tensão e corrente RMS, das potências ativa e aparente e do fator de potência são os ganhos de tensão e de corrente do medidor. Para isso, fez-se o uso das equações 4 e 5 e com o auxílio de dois multímetros (HP 3468A), e foi possível calcular os ganhos ao

comparar os resultados obtidos no medidor com os do multímetro, e depois calcular os demais itens desejados através das equações 6, 7 e 8.

$$V_{rms} = G_v \sqrt{\sum_{n=1}^N \frac{v[n]^2}{N}} \quad (4)$$

$$I_{rms} = G_i \sqrt{\sum_{n=1}^N \frac{i[n]^2}{N}} \quad (5)$$

$$P = G_v * G_i \sum_{n=1}^N \frac{i[n] * v[n]}{N} \quad (6)$$

$$S = V_{rms} * I_{rms} \quad (7)$$

$$FP = \frac{P}{S} \quad (8)$$

V_{rms} é o valor eficaz da tensão, I_{rms} o valor eficaz da corrente, G_v e G_i são os ganhos das amostras de tensão e da corrente, n é o índice de amostra, $v[n]$ a n -ésima amostra do sinal de tensão, $i[n]$ a n -ésima amostra do sinal da corrente, N o número de amostras, P é o valor da potência ativa, S é o valor da potência aparente e FP o fator de potência.

O módulo de comunicação infravermelho, possui duas partes, uma de recepção e outra de transmissão dos sinais infravermelhos. O circuito receptor possui um demodulador de infravermelho alimentado com 5 Volts e em sua saída um divisor resistivo formado por um resistor de $R8 = 10 \text{ k}\Omega$ e outro de $R11 = 18 \text{ k}\Omega$ conectados à entrada UCA2RXD do microcontrolador.

Já o circuito transmissor é composto por um Led infravermelho IRM-8651 alimentado com uma tensão de 5 V. Um transistor BC548 do tipo NPN foi utilizado junto com resistor $R20 = 1 \text{ k}\Omega$ para a realização da demodulação do sinal com o auxílio da porta PM_TA0.2 do microcontrolador. A modulação utilizada foi a Modulação de Largura de Pulso (PWM) com uma frequência de 38 kHz. Outro transistor similar ao anterior foi utilizado para o chaveamento do sinal conectado a um resistor $R19 = 10 \text{ k}\Omega$ e a porta UCA2TXD do microcontrolador. Esse circuito se faz presente tanto no concentrador de medidas quanto nos medidores de energia, para possibilitar uma

comunicação *duplex* entre os dois módulos. Esse sistema foi escolhido por possuir um baixo custo em relação a outros meios de comunicação e por ser de fácil implementação.

Já o módulo de processamento é formado pelo microcontrolador MSP430F6736, um cristal de 32.768 kHz, capacitores de desacoplamento C12, C14, C15, C17, C19 e C26 = 100 nF, C13, C16, C18, C20 = 4,7 UF e C21 = 470 nF, cuja finalidade é eliminar os ruídos na alimentação do microcontrolador e também suprir a necessidade de corrente do microcontrolador quando se faz necessário. Para a gravação no microcontrolador, foi utilizada uma interface JTAG. O dispositivo também possui 3 Leds indicadores do estado do microcontrolador.

O módulo de armazenamento é composto por um circuito de interface com cartões de memória SD, sendo que foi utilizada um cartão SD removível de 2 GB de capacidade. Esse tipo de memória foi selecionado pelo baixo custo, já que é utilizado em praticamente todos os dispositivos portáteis atuais que necessitam de memória de massa. O dispositivo desenvolvido pode ser visualizado na Figura 7.

4.2 Módulo do Concentrador de Medidas

O módulo do concentrador de medidas foi projetado para adquirir os dados gerados pelos medidores desenvolvidos. Composto pelos módulos de comunicação infravermelha e de armazenamento e seu protótipo é apresentado na figura 8.

O esquemático foi projetado de forma similar ao medidor desenvolvido, como pode ser visualizado nos Apêndices C e D, adicionando um botão para o acionamento do concentrador e retirando o módulo medidor e da fonte de alimentação.

Para o fornecimento das tensões necessárias, foram utilizadas 3 pilhas AAA, que fornecem as tensões de 3 Volts e de 4,5 Volts, suficientes para o funcionamento do circuito.

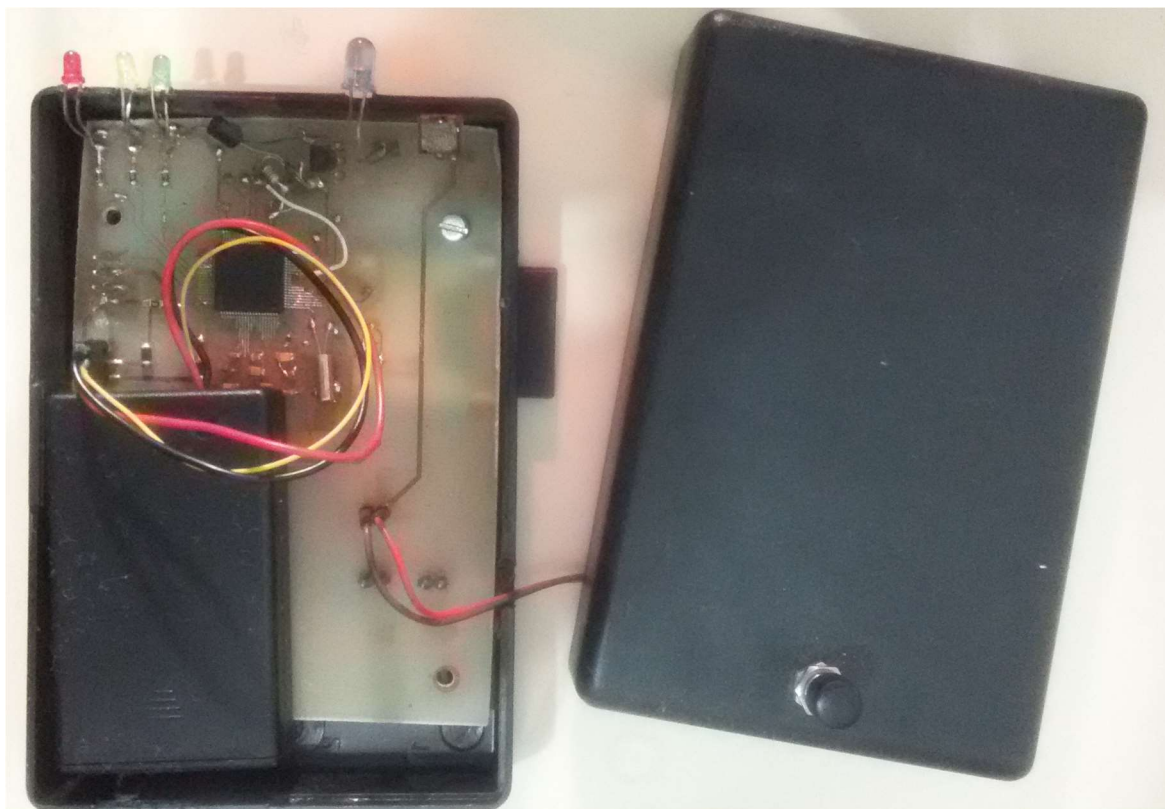


Figura 8: Concentrador de medidas desenvolvido
Fonte: material elaborado pelo autor.

4.3 Firmware do Módulo Medidor

O *firmware* do módulo medidor de energia elétrica foi desenvolvido em módulos com o objetivo de facilitar correções e futuras atualizações do mesmo, facilitar a leitura e depuração do código, que foi escrito em linguagem C com utilização do compilador IAR C/C++ Compiler for MSP430 v.5.40.1.

Na figura 9 é apresentado o fluxograma criado para representar o *firmware* do medidor de energia elétrico desenvolvido. Primeiramente, o programa entra em uma parte de inicialização, onde as funções são executadas uma única vez logo após o sistema ser ligado ou após uma reinicialização. As demais funções são executadas na forma de um loop infinito, executados periodicamente até que o medidor seja desligado. Nesse loop o sistema pode ficar adquirindo dados ou transmitindo os dados via o sistema de comunicação infravermelho.

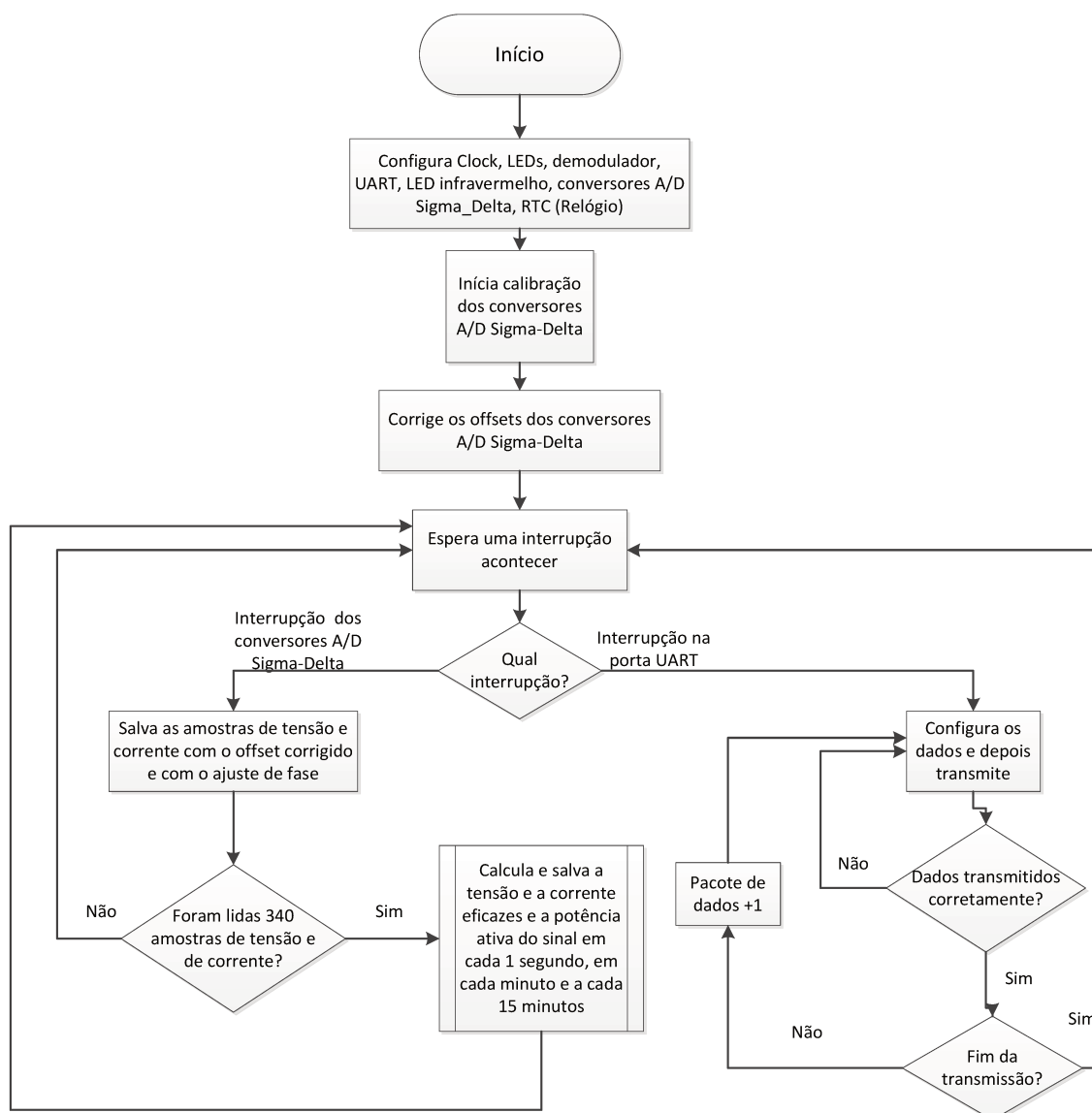


Figura 9: Fluxograma do medidor de energia elétrica desenvolvido.

Fonte: material elaborado pelo autor.

Na primeira etapa, o *hardware* do microcontrolador é configurado. Entre essas configurações, a do watchdog que é desligado, o ajuste dos clocks, dos LEDs indicadores, da entrada do demodulador de infravermelho, das saídas circuito transmissor do sinal modulado de infravermelho, dos conversores A/D sigma-Delta e do RTC.

O Master Clock do microcontrolador (MCLK) não foi modificado e permaneceu em sua configuração inicial de aproximadamente 1.1MHz e o clock auxiliar (ACLK) foi conectado a um cristal de aproximadamente 32.768kHz.

Os conversores A/D Sigma-Delta são configurados inicialmente para a realização da calibração, e depois faz um curto circuito via *hardware* nas entradas

diferenciais de cada conversor. Posteriormente são realizadas 68 medidas para se obter o ciclo completo em uma rede elétrica de 60Hz. Depois são realizadas as médias das amostras de cada conversor para obter seus respectivos offsets. Esses valores serão subtraídos das futuras amostras com a finalidade de corrigir os erros de offset dos conversores.

Na segunda etapa, o sistema entra em um loop infinito, aguardando as interrupções dos conversores ou da porta UART. A cada interrupção dos conversores, as amostras de tensão e corrente são salvas e a potência ativa é calculada. A cada segundo, são obtidos os 5 primeiros ciclos completos da corrente e tensão alternadas do total de 60 possíveis (60Hz) e posteriormente é realizado o ajuste de fase. Nesses 5 ciclos são adquiridas 340 amostras do sinal, mas para obter uma melhor exatidão do início e final dos ciclos, apenas o número de amostras equivalentes a 4 ciclos de corrente e tensão alternadas são utilizadas nos cálculos da tensão e corrente eficazes e da potência ativa. Esses dados são salvos no cartão SD a cada segundo e também ao atingir as marcas de cada minuto e a cada 15 minutos em função das concessionárias de energia que tem liberdade de desenvolver os seus respectivos projetos de eficiência energética.

Ao ocorrer uma interrupção na porta UART, primeiramente é definido o número de bytes a serem remetidos. Ao término da contagem dos bytes, esses dados que estão salvos no cartão de memória são separados em pacotes de dados equivalentes a 12 horas de amostras. Esses pacotes de dados são transmitidos byte por byte até o fim do pacote e durante essa transmissão, esses bytes são salvos em uma variável que servirá para verificar a correta transmissão desses dados. Após a transmissão essa variável é transmitida junto com um indicador de fim de transmissão e entra em um estado de espera de um sinal de erro ou de acerto para poder enviar o próximo pacote de dados, voltando a entrar no loop esperando as interrupções ocorrerem.

4.4 Firmware do Controle Receptor dos dados

O *firmware* do módulo do Controle Receptor de Dados também foi desenvolvido em módulos com as mesmas finalidades do medidor e também escrito em linguagem C, utilizando o compilador IAR C/C++ Compiler for MSP430 v.5.40.1. Na figura 10 pode-se ver o fluxograma do *firmware*.

Ao inicializar, o controle sofre as mesmas configurações que o módulo medidor citado acima, com exceção dos conversores e do RTC, que não são necessários neste módulo. Depois o microcontrolador entra no estado de baixo consumo esperando uma interrupção, que ocorre ao pressionar o botão de início.

Acionando o botão, o microcontrolador sai do modo de baixo consumo e envia o sinal de início de transmissão para o medidor junto com o número do dispositivo. Logo após, o dispositivo fica aguardando o número de pacotes a serem recebidos. Os dados dos pacotes são conferidos byte por byte e se tiver algum erro, um código de erro é enviado para o medidor, caso contrário, é enviado um sinal com um código de acerto. Concluída a recepção dos dados, o microcontrolador volta ao estado de baixo consumo aguardando uma interrupção acontecer. Na figura 11 pode-se observar o diagrama de sequência exemplificando as mensagens entre os módulos desenvolvidos.

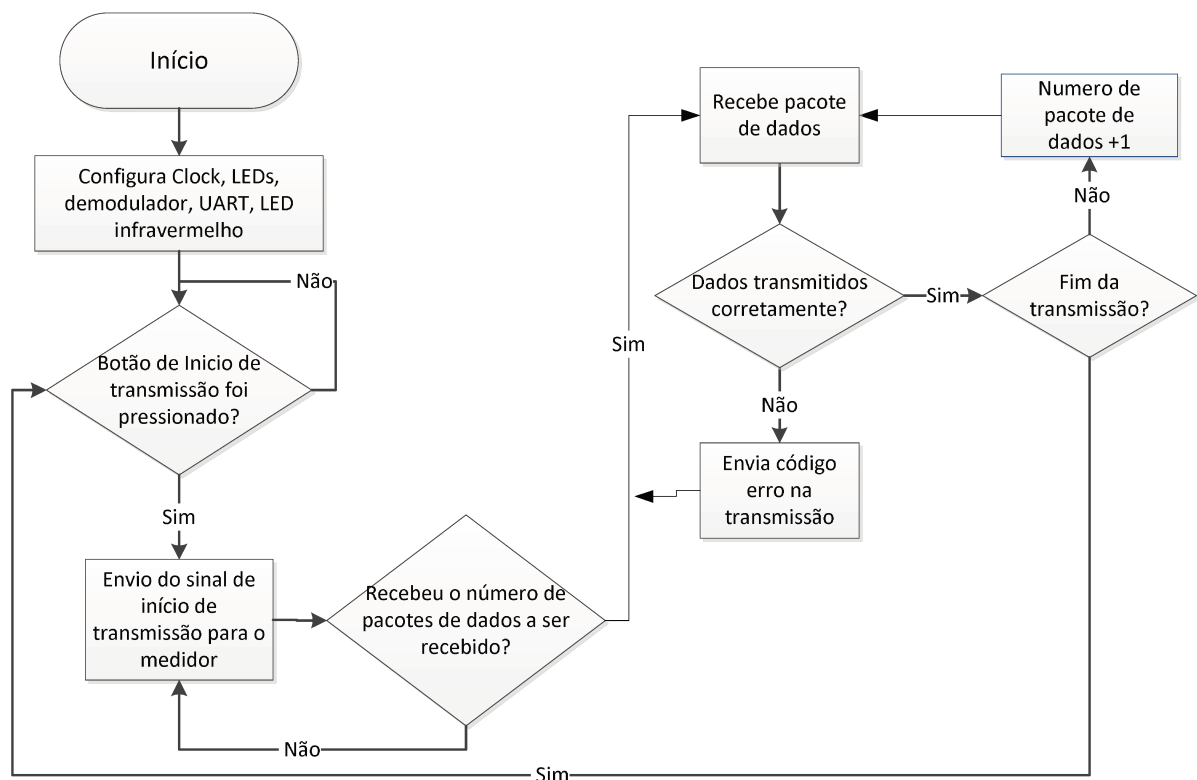


Figura 10: Fluxograma do controle receptor de dados
Fonte: material elaborado pelo autor.

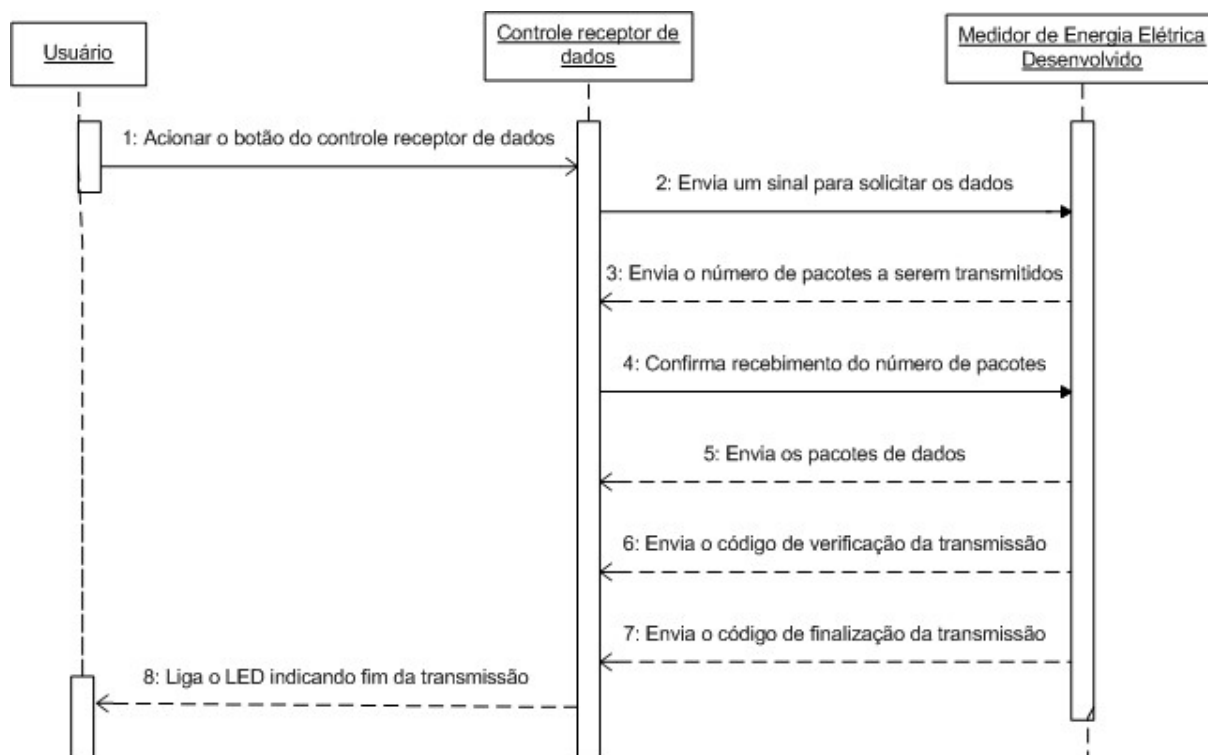


Figura 11: Diagrama de sequência exemplificando as mensagens entre os módulos

Fonte: material elaborado pelo autor.

4.5 Programa para o usuário

O programa desenvolvido, com o código fonte do programa podendo ser visualizado no apêndice E, tem como finalidade realizar a leitura dos dados coletados pelos medidores pela leitura do cartão de memória de cada dispositivo ou do concentrador de medidas, registra essas informações em um banco de dados para uma análise do comportamento do consumo de energia elétrica do usuário de forma diária, semanal ou mensal.

Com esse banco de dados é possível gerar relatórios e gráficos do perfil de consumo do usuário. Esses relatórios são baseados no formato de preferência das distribuidoras, que têm optado por efetuar medições rápidas, antes e depois de uma ação de eficiência energética, como a troca de lâmpadas e geração de dados apenas de potência e energia, sem considerar que outras variáveis influenciam no consumo de energia. O programa, que pode ser visualizado nas figuras 12 e 13, foi desenvolvido com utilização do *software* LabVIEW 2012.

Figura 12: Tela inicial do programa desenvolvido.
Fonte: material elaborado pelo autor.

Figura 13: Tela com os resultados do programa desenvolvido.
Fonte: material elaborado pelo autor.

Em sua tela inicial, existem três entradas de dados, responsáveis por inserir no programa os dados retirados dos dispositivos medidores. São eles os arquivos de potência e os que contêm as informações de tempo de permanência de uso. A última entrada é responsável pela entrada do preço cobrado pelas concessionárias de energia elétrica por kWh.

Ao inserir esses dados, é possível observar as informações com a potência consumida pelo dispositivo medidor e o consumo total em Watts gastos pelo período em que o medidor permaneceu em funcionamento.

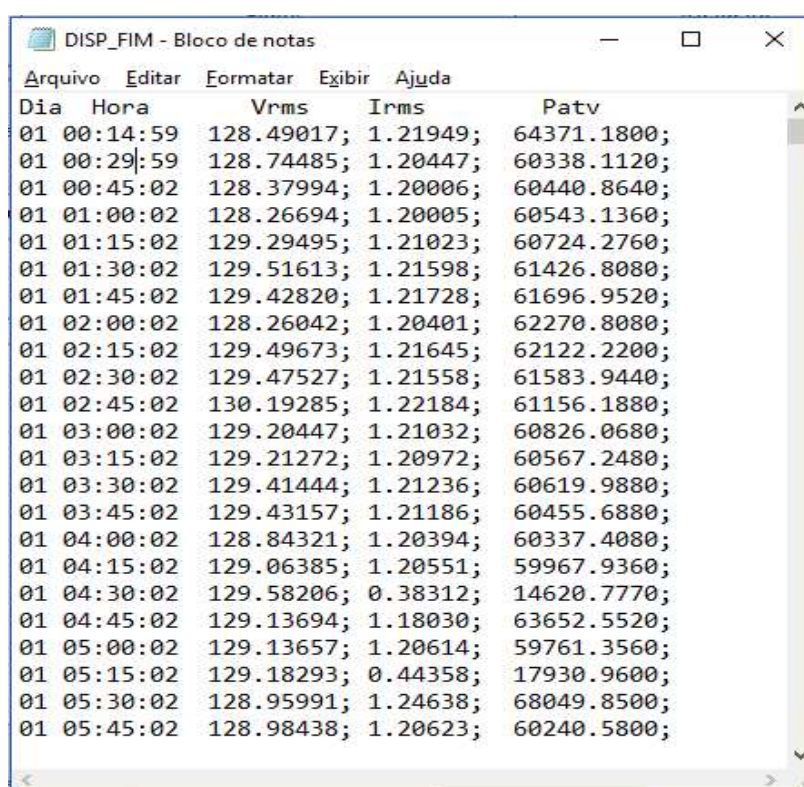
Posteriormente, é possível analisar os gráficos nas demais abas, que correspondem ao período de um mês, dividido em quatro semanas. Cada aba semanal possui outras sete abas com os respectivos dias da semana.

Além do gráfico do consumo diário, são apresentadas informações diárias como a potência consumida, tempo de funcionamento e o gasto em Reais do aparelho conectado ao medidor.

5 Resultados

Entre os principais desafios propostos no projeto, pode-se citar o de obter um dispositivo de fácil instalação, de baixo consumo e de baixo custo, com a utilização de um sistema de comunicação via infravermelho como alternativa a outros projetos desenvolvidos no DSIF que utilizam outros meios de comunicação com custo elevado, o que poderia inviabilizar o uso do sistema em todos os dispositivos elétricos de uma residência e acarretar uma perda de dados valiosos em uma análise completa.

Com o objetivo de validar o sistema proposto, foram realizadas algumas medições de consumo de energia elétrica em diferentes tipos de cargas, realizado primeiramente em uma geladeira com 90 Watts de potência e 127 Volts de uma residência com um morador. O medidor gerou e salvou em um cartão de memória SD um relatório com os dados da potência ativa e da tensão e corrente RMS, em uma ordem cronológica, discriminando o número de dias e o intervalo de tempo em que as medições foram salvas no cartão de memória, como pode ser observado na figura 14.



Dia	Hora	Vrms	Irms	Patv
01	00:14:59	128.49017;	1.21949;	64371.1800;
01	00:29:59	128.74485;	1.20447;	60338.1120;
01	00:45:02	128.37994;	1.20006;	60440.8640;
01	01:00:02	128.26694;	1.20005;	60543.1360;
01	01:15:02	129.29495;	1.21023;	60724.2760;
01	01:30:02	129.51613;	1.21598;	61426.8080;
01	01:45:02	129.42820;	1.21728;	61696.9520;
01	02:00:02	128.26042;	1.20401;	62270.8080;
01	02:15:02	129.49673;	1.21645;	62122.2200;
01	02:30:02	129.47527;	1.21558;	61583.9440;
01	02:45:02	130.19285;	1.22184;	61156.1880;
01	03:00:02	129.20447;	1.21032;	60826.0680;
01	03:15:02	129.21272;	1.20972;	60567.2480;
01	03:30:02	129.41444;	1.21236;	60619.9880;
01	03:45:02	129.43157;	1.21186;	60455.6880;
01	04:00:02	128.84321;	1.20394;	60337.4080;
01	04:15:02	129.06385;	1.20551;	59967.9360;
01	04:30:02	129.58206;	0.38312;	14620.7770;
01	04:45:02	129.13694;	1.18030;	63652.5520;
01	05:00:02	129.13657;	1.20614;	59761.3560;
01	05:15:02	129.18293;	0.44358;	17930.9600;
01	05:30:02	128.95991;	1.24638;	68049.8500;
01	05:45:02	128.98438;	1.20623;	60240.5800;

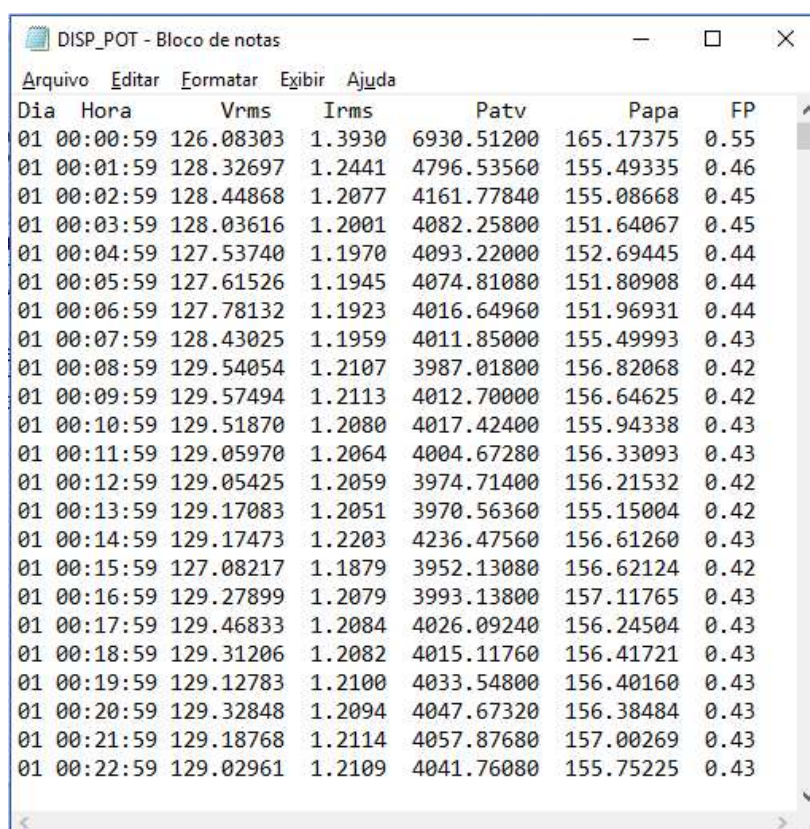
Figura 14: Arquivo gerado pelo medidor de energia elétrica desenvolvido.

Fonte: material elaborado pelo autor.

Na primeira coluna do arquivo gerado apresenta-se o número do dia em que a medição foi iniciada, seguida por um intervalo de tempo no qual os dados são salvos,

no caso a cada 15 minutos, depois o valor da tensão e da corrente eficazes, em Volts e Amperes respectivamente, e por último a potência ativa em Watts, que está multiplicada por um fator de 3600.

Em paralelo a esse arquivo, também foi gerado um outro relatório similar ao anterior, porém com informações mais completas para serem utilizados em outros programas. Entre as diferenças está o intervalo de tempo em que as informações são salvas, que passou a ser a cada minuto e a adição dos valores da potência aparente e do fator de potência, como pode ser visualizado na figura 15.



Dia	Hora	Vrms	Irms	Patv	Papa	FP
01	00:00:59	126.08303	1.3930	6930.51200	165.17375	0.55
01	00:01:59	128.32697	1.2441	4796.53560	155.49335	0.46
01	00:02:59	128.44868	1.2077	4161.77840	155.08668	0.45
01	00:03:59	128.03616	1.2001	4082.25800	151.64067	0.45
01	00:04:59	127.53740	1.1970	4093.22000	152.69445	0.44
01	00:05:59	127.61526	1.1945	4074.81080	151.80908	0.44
01	00:06:59	127.78132	1.1923	4016.64960	151.96931	0.44
01	00:07:59	128.43025	1.1959	4011.85000	155.49993	0.43
01	00:08:59	129.54054	1.2107	3987.01800	156.82068	0.42
01	00:09:59	129.57494	1.2113	4012.70000	156.64625	0.42
01	00:10:59	129.51870	1.2080	4017.42400	155.94338	0.43
01	00:11:59	129.05970	1.2064	4004.67280	156.33093	0.43
01	00:12:59	129.05425	1.2059	3974.71400	156.21532	0.42
01	00:13:59	129.17083	1.2051	3970.56360	155.15004	0.42
01	00:14:59	129.17473	1.2203	4236.47560	156.61260	0.43
01	00:15:59	127.08217	1.1879	3952.13080	156.62124	0.42
01	00:16:59	129.27899	1.2079	3993.13800	157.11765	0.43
01	00:17:59	129.46833	1.2084	4026.09240	156.24504	0.43
01	00:18:59	129.31206	1.2082	4015.11760	156.41721	0.43
01	00:19:59	129.12783	1.2100	4033.54800	156.40160	0.43
01	00:20:59	129.32848	1.2094	4047.67320	156.38484	0.43
01	00:21:59	129.18768	1.2114	4057.87680	157.00269	0.43
01	00:22:59	129.02961	1.2109	4041.76080	155.75225	0.43

Figura 15: Arquivo gerado pelo medidor de energia elétrica desenvolvido com informações salvas a cada minuto.

Fonte: material elaborado pelo autor.

Para testar outros tipos de cargas, foram conectadas no medidor cargas resistivas (lâmpada incandescente de 60 e 150 Watts) e uma carga eletrônica (notebook). Para efeitos comparativos, as medidas encontradas foram comparadas com os valores de corrente e tensão medidos por dois multímetros HP 3468A, e as potências ativas foram comparadas pela medida adquirida pelo medidor desenvolvido, pelo medidor comercial HS110 da TP-LINK e pela calculada, multiplicando os valores de correntes e tensões medidos com os multímetros da HP (tabela 5).

Tabela 5: Comparação das medidas adquiridas por diferentes medidores

	Vrms (V)	Irms (A)	Pot. Ativa calculado (Watts)	Pot. Ativa Medidor Desenvolvido (Watts)	Pot. Ativa do Medidor comercial (Watts)
Lâmpada Incandescente 60W	127,8	0,51366	65,64	62,65154	62,4
Lâmpada Incandescente 150W	126,0	1,17021	147,44	145,94545	145
Notebook	129,0	0,50906	36,12	36,78289	37,4

Fonte: material elaborado pelo autor.

Com a validação das medidas realizadas pelos medidores desenvolvidos, os relatórios gerados por eles foram transferidos por meio do sistema de comunicação infravermelho para o dispositivo concentrador, que recebeu e salvou o mesmo relatório no seu cartão de memória. Após o término da recepção de dados, o cartão foi retirado e inserido em um computador com um *software* capaz de realizar as leituras e gerar os gráficos e relatórios de consumo, como pode ser visualizado nas Fig. 16 e 17.

Para analisar os dados fornecidos pelo medidor conectado à geladeira, o arquivo do seu relatório foi inserido no programa e tornou possível observar os momentos em que o eletrodoméstico permaneceu desligado, verificando o funcionamento do mesmo, já que ele desligou em intervalos de tempo similares. A potência diária consumida, verificada diária e semanalmente, teve valores parecidos com a do medidor comercial. Esses dados também foram compatíveis com a média de consumo mensal das cargas.

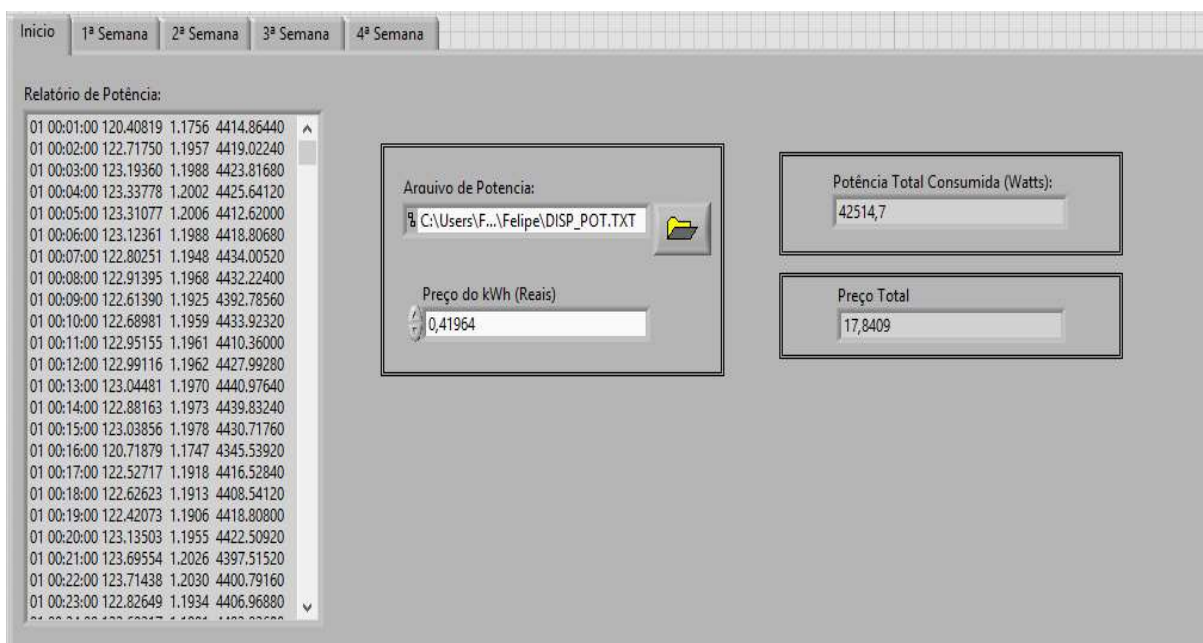


Figura 16: Tela Inicial do Programa para a entrada dos arquivos.

Fonte: material elaborado pelo autor.

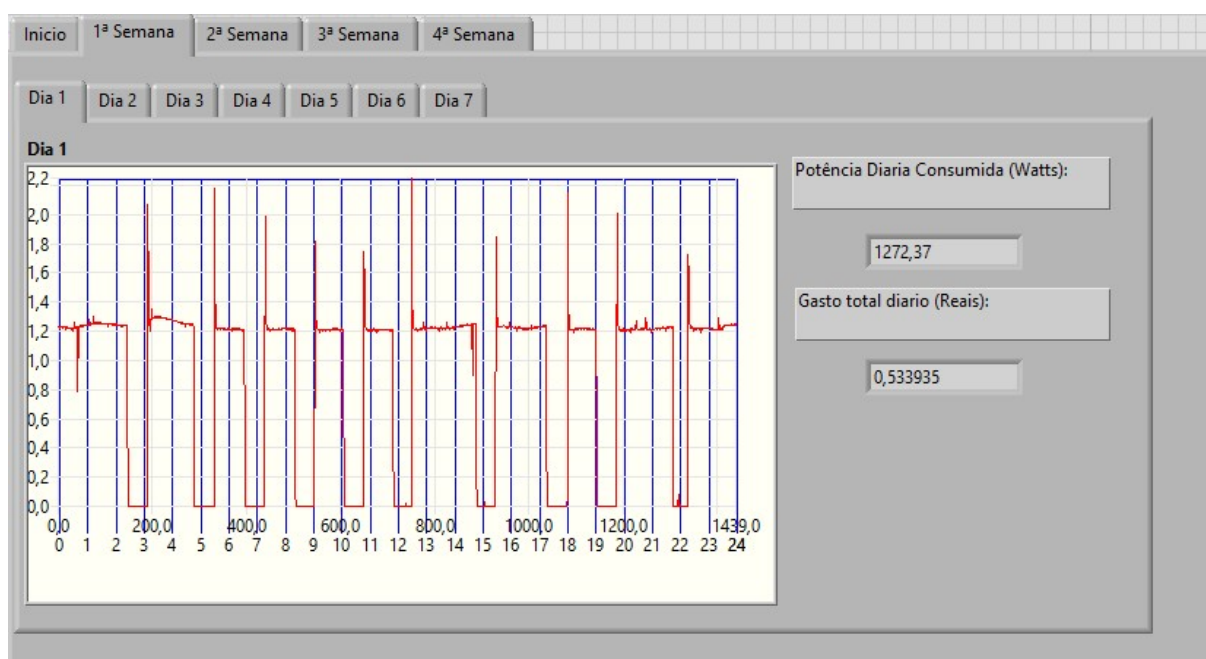


Figura 17: Imagem do Programa com os dados inseridos

Fonte: material elaborado pelo autor.

Ao realizar a análise de custo do medidor, foi possível certificar o baixo custo do equipamento, embora seja um protótipo. Na tabela 6, é possível observar os preços de cada componente utilizado na placa, tendo como referência sites internacionais e nacionais de venda de componentes eletrônicos com preços no varejo.

Tabela 6: Lista de preço dos componentes do medidor de energia elétrica desenvolvido

Componente	Qnt	Custo unitário(US\$)	Custo Total(US\$)
MSP430F6736 80 PIN	1	6,96	6,96
Capacitor eletrolítico 100uF	1	0,1	0,1
Capacitor eletrolítico 10uF	1	0,1	0,1
Capacitor eletrolítico 2.2uF	1	0,1	0,1
Capacitor 100nF	10	0,025	0,25
Capacitor 33nF	5	0,14	0,7
Capacitor 4.7uF	4	0,1	0,4
Capacitor 470nF	2	0,1	0,2
Capacitor 47uF	1	0,1	0,1
Borne 2 vias	2	0,25	0,5
Transformador de corrente	1	1	1
Diode 1N4007	2	0,22	0,44
Fusível	1	0,15	0,15
Barra de Pinos	1	0,15	0,15
Ferrite	2	0,3	0,6
LED	3	0,05	0,15
LED infravermelho	1	0,12	0,12
Demodulador Infravermelho	1	0,72	0,72
Conector cartão SD	1	0,5	0,5
BC548 NPN	1	0,21	0,21
Resistor 24k	1	0,1	0,1
Resistor 1k	5	0,05	0,25
Resistor 10R	1	0,1	0,1
Resistor 10k	1	0,1	0,1
Resistor 18k	1	0,1	0,1
Resistor 47R	1	0,1	0,1
Resistor >10k	1	0,1	0,1
Resistor 47k	2	0,1	0,2
Resistor 150R	1	0,1	0,1
Resistor 470R	2	0,1	0,2
Transformador 127 - 6+6 V	2	3	6
Regulador de Tensão 5V	1	0,41	0,41
Regulador de Tensão 3.3V	1	0,41	0,41
Cristal	1	0,13	0,13
Caixa	1	3,49	3,49
TOTAL:	64		25,24

Fonte: material elaborado pelo autor.

Considerando apenas o preço dos componentes do protótipo desenvolvido com o preço de medidores já vendidos comercialmente, vide tabela 4, verifica-se uma boa diferença de preços. O modelo comercial mais em conta, da Alertme, que custa £25 (R\$ 95,75 na cotação da Libra esterlina a R\$3,834) sai 24,4% mais caro do que o medidor desenvolvido US\$25,24 (R\$ 76,97), valores considerados na cotação do dia 16/02/2017. E como todos os medidores vendidos comercialmente são importados, deve-se adicionar ao custo final o frete e mais os impostos. Não foram levados em consideração o custo da confecção do PCB e de montagem entre outros.

Também deve-se considerar que o medidor desenvolvido pode ter seu custo reduzido em pelo menos 40% quando fabricado em escala comercial com componentes comprados no atacado. Essa relação foi encontrada ao comparar os custos dos componentes eletrônicos no atacado e no varejo.

Os dados obtidos nos relatórios também apresentaram maior precisão (10 W), enquanto no medidor comercial a resolução é de apenas 100 W.

6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

6.1 Conclusões

Neste trabalho foi desenvolvido um sistema de medição de energia elétrica para medição e verificação de consumidores de baixa-renda para programas de eficiência energética; assim promove o uso eficiente da energia elétrica e maximiza os benefícios públicos da energia economizada e possibilita a criação de novos hábitos e práticas racionais do uso da energia elétrica.

Esta pesquisa foi dividida em três partes. A primeira compreendeu a medição de energia elétrica; a segunda envolveu o armazenamento e a transmissão de dados entre os dispositivos, e a última, o desenvolvimento de uma interface para os usuários finais, de modo a formar um sistema completo de medição para M&V de consumidores de baixa renda, utilizados em programas de eficiência energética.

Foi desenvolvido um medidor de energia elétrica capaz de operar em redes monofásicas e bifásicas de tensão nominal de até 220 V_{RMS}, e corrente máxima de 20 A_{RMS}, por circuito. Com os experimentos realizados, foi possível identificar a tensão e a corrente eficazes, as potências ativa e reativa e o fator de potência de diferentes tipos de cargas encontradas em uma residência.

Também foi desenvolvido um concentrador de medidas, responsável por concentrar todos os dados adquiridos pelos medidores de energia elétrica. Tal qual o medidor de energia, este foi dotado de um sistema de transmissão de dados com a utilização de tecnologia infravermelho, que possibilitou uma comunicação *half-duplex* entre os dois módulos.

Neles também foi inserida uma memória de massa para aumentar a capacidade de armazenamento de dados dos medidores caso necessário, e para aumentar a quantidade do número de medidores que cada concentrador de medidas pode atender sem a necessidade de utilizar mais de um.

Um programa foi desenvolvido com a finalidade de facilitar para os usuários finais o consumo e o gasto diário de energia elétrica para os diferentes tipos de cargas em uma residência. Nele é possível visualizar o relatório de cada medidor, o consumo total de energia elétrica consumida diária, semanal ou mensalmente. Também é

possível observar o tempo em que as cargas estavam consumindo energia elétrica e visualizar essas informações de forma gráfica no período de um dia.

Os circuitos desenvolvidos foram projetados para ter um baixo custo, com a finalidade de serem utilizados em programas de eficiência energética. Por utilizar um sistema de comunicação barato e bem conhecido e por possuir um circuito simples, foi possível montar os protótipos com pelo menos uma redução de 31% do custo de um medidor de energia elétrica comercial vendido em outros países, com a manutenção da mesma eficiência. Essa redução pode ser maior se considerado o gasto com a importação, taxas de impostos, fretes e também ao ser produzido em larga escala.

O sistema de medição desenvolvido também mostrou maior facilidade para os usuários em relação ao medidor comercial que foi utilizado como comparação, já que o medidor de energia elétrica e o concentrador de medidas não dependem de uma rede Wi-Fi e nem de um celular como no medidor comercial, o qual também não permite a retirada dos dados para uma análise posterior, pois é possível apenas a sua visualização no display.

6.2 Trabalhos Futuros

Como trabalho futuro pretende-se implementar o sistema de medição de energia elétrica em um programa de eficiência energética para consumidores de baixa renda, assim como aperfeiçoar o programa desenvolvido para poder analisar os demais dados adquiridos pelo medidor e então utilizá-lo fora do ambiente domiciliar.

E como alternativa ao concentrador de medidas, pretende-se desenvolver um aplicativo de celular que possibilite a recepção e manipulação das medidas adquiridas através de uma comunicação por infravermelho para reduzir os custos e facilitar a utilização do sistema de monitoramento do consumo elétrico por parte dos usuários finais.

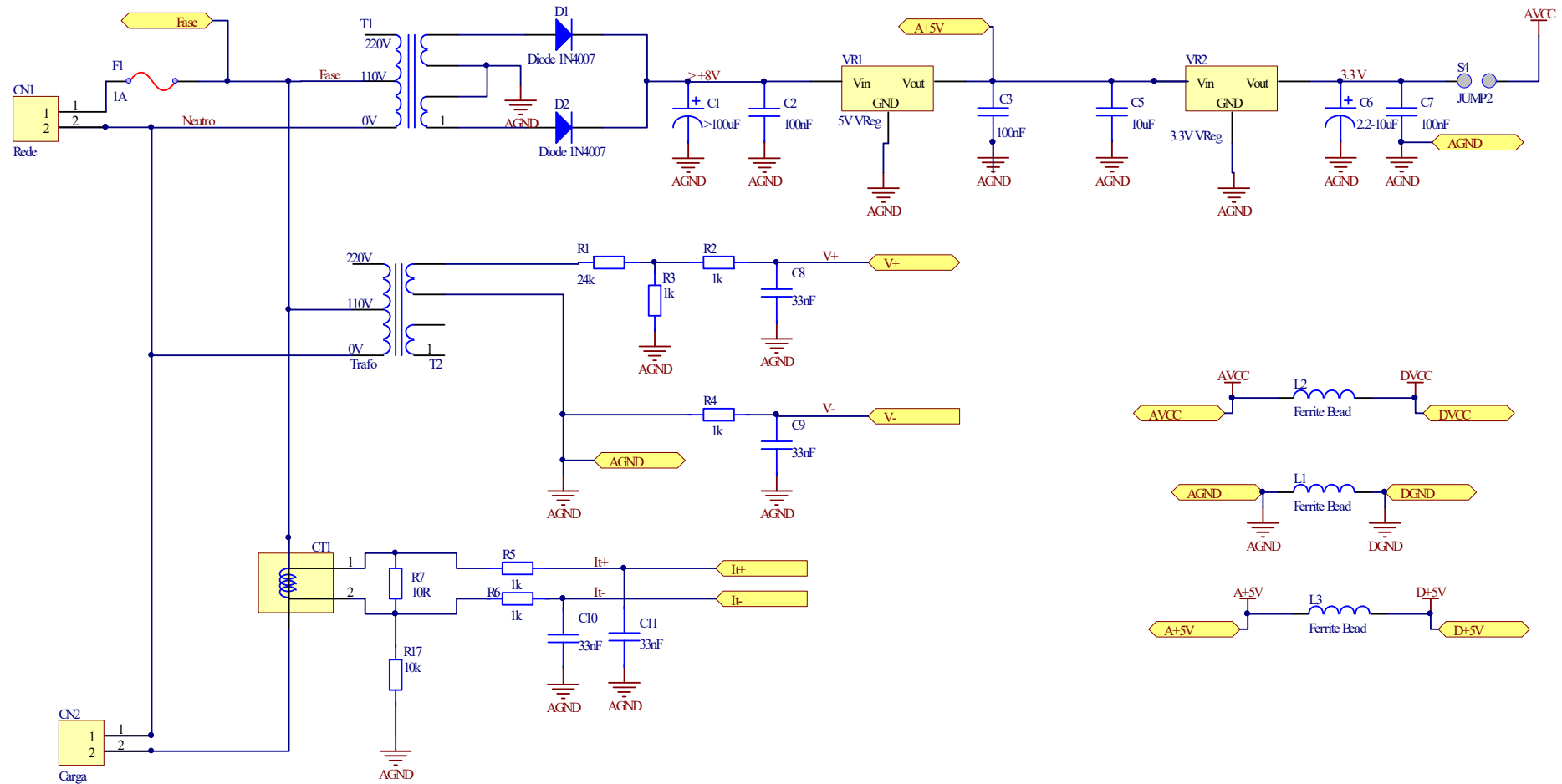
Referências:

1. AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Estabelece os requisitos e procedimentos para a obtenção de outorga de autorização para exploração de aproveitamento de potencial hidráulico com características de Pequena Central Hidrelétrica – PCH. Resolução n. 673, de 04 de agosto de 2015.
2. AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. “BIG – Banco de Informações de Geração”. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>>. Acesso em: 17 de junho 2017.
3. ABBUD, O. A.; “Por que hidrelétricas (com reservatório) são a melhor opção para o Brasil? Brasil, economia e governo. Infraestrutura e petróleo”. Disponível em: < <http://www.brasil-economia-governo.org.br/2012/07/10/por-que-hidreletricas-com-reservatorio-sao-a-melhor-opcao-para-o-brasil>>. Acesso em 25 junho 2017.
4. EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. “Plano Decenal de Expansão de Energia – PDE”. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/pdee/forms/epeestudo.aspx>>. Acesso em: 25 junho 2017.
5. OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. “Situação dos Principais Reservatórios do Brasil”. Disponível em: <http://www.ons.org.br/tabela_reservatorios/conteudo.asp>. Acesso em: 28 de janeiro 2016.
6. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. “Eficiência energética e conservação de energia”. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/clima/energia/eficiencia-energetica>>. Acessado em: 20 de março 2016.
7. HADDAD, J.; MARTINS, A. R. S.; MARQUES, M. C. S. “Conservação de Energia: Eficiência energética de equipamentos e Instalações”. 3. ed. Itajubá: EFEI, 2006.
8. RIBEIRO, H. M. P. “Plano de Racionalização de Consumo de Energia”. Elaboração e Acompanhamento. Dissertação de Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores. Universidade de Coimbra. Fevereiro/2016
9. PANDIT, N.; KNIGHT, D.; OWEN, E.; STONER, T.; POOLE, A. “Alternative Market Frameworks for ESCO Finance: Designing Instruments and Institutional Strategies for Financing Energy Efficiency Products in Brazil”. 2001.
10. WIE, S.; MCMAHON, J. E.; “Energy-Efficiency Labels And Standart: A Guidebook For Appliances, Equipament, And Lighting”. 2001.
11. JANNUZZI, G.; SAIDEL, M.; HADDAD, J.; POOLE, A. “Avaliação dos programas de eficiência energética das concessionárias de distribuição de eletricidade e sugestões para a revisão da sua regulamentação”. 2007.
12. AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. “Investimento no PEE desde a publicação da RN 300/2008 até março de 2016”. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/arquivos/Excel/PEE%20Projetos.xls>>. Acesso em: 17 de junho 2017.
13. COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS. “Eficiência Energética”. Disponível em: < http://www.cemig.com.br/pt-br/A_Cemig_e_o_Futuro/sustentabilidade/nossos_programas/mudancas_climaticas/Paginas/eficiencia_energetica.aspx>. Acesso em: 17 de junho 2017.
14. WIKIPÉDIA. “Eficiência energética”. Disponível em: <http://pt.wikipedia.org/wiki/Efici%C3%AAncia_energ%C3%A9tica>. Acesso em: 17 de junho 2017.
15. JANNUZZI, G. M. “Políticas públicas para eficiência energética e energia renovável no novo contexto de mercado: uma análise da experiência recente dos EUA e do Brasil 2000”. 2000.
16. PROCEL. “Procel selo - Eficiência Energética em Equipamentos”. Disponível em: <<http://www.procelinfo.com.br/data/Pages/LUMIS623FE2A5ITEMIDF05F4A2E14D84958AAEE698B55F104EAPTBRIE.htm#>>. Acesso em: 17 de junho 2017.
17. INSTITUTO NACIONAL DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA. “Introdução ao uso da medição e verificação de economias de energia no Brasil”. Disponível em: <http://www.inee.org.br/down_loads/escos/Intro_mv.pdf>. Acesso em: 17 de junho 2017.
18. EVO - EFFICIENCY VALUATION ORGANIZATION. Protocolo Internacional de Medição e verificação de Performance - PIMVP - Conceitos e Opções para a Determinação de Economias de Energia e de Água - Volume 1. 2012.
19. INSTITUTO NACIONAL DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA. “Medição & verificação”. Disponível em: <http://www.inee.org.br/escos_mev.asp?Cat=mev>. Acesso em: 11 dez. 2016.

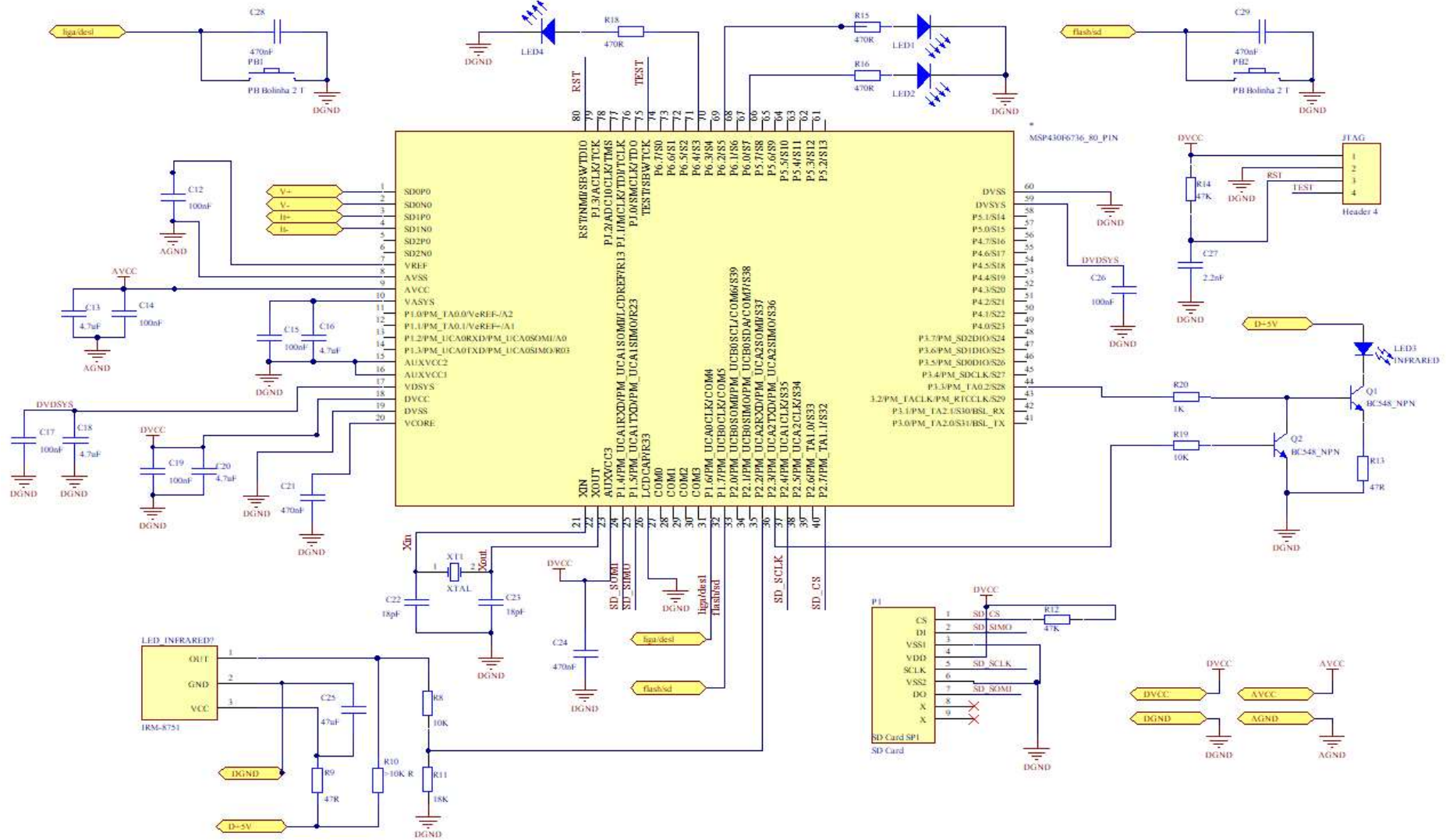
20. CENTRO BRASILEIRO DE INFORMAÇÃO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA. "Procel info". Disponível em < <http://www.procelinfo.com.br/main.asp>>. Acesso em 9 de março 2016.
21. MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. "Plano nacional de eficiência energética – Premissas e diretrizes Básicas". 2011.
22. ELETROBRÁS/PROCEL. "Avaliação do Mercado de Eficiência Energética no Brasil. Pesquisa de Posse de Equipamentos e hábitos de consumo. Ano base 2005. Classe Residencial. Relatório Brasil". Julho 2007.
23. PROCEL. "Pesquisa de Posse de Equipamentos e Hábitos de Consumo de Energia". Disponível em: <<http://www.procelinfo.com.br/data/Pages/LUMIS05070313PTBRIE.htm>>. Acesso em 29 de março de 2016.
24. PROCEL. "SINPHA - Sistema de Informação de Posses e Hábitos de Uso de Aparelhos Elétricos". Disponível em: <<http://www.procelinfo.com.br/main.asp?View=%7BA6340DFB-8A42-41FC-A79D-B43A839B00E9%7D&Team=¶ms=itemID=%7BA797016A-8D13-4E7B-B5C3-0ECE28880269%7D;&UIPartUID=%7B05734935-6950-4E3F-A182-629352E9EB18%7D>>. Acesso em 29 de março de 2016.
25. FAGUNDES, W. C. "Estimativa do Fator de Carga (FC) e Fator de Demanda (FD) de Consumidores de Energia Elétrica Via Medição e Pesquisa de Posses e Hábitos". Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre pelo Programa de PósGraduação em Metrologia (Área de concentração: Metrologia para Qualidade e Inovação) da PUC-Rio. Rio de Janeiro, abril de 2011.
26. CCK Automação, "A importância da medição de energia para eficiência energética", 2014.
27. MARTINS, J. C.; SIQUEIRA, J. C.; BATISTA, E. A. "Sistema de monitoramento (PMS) de Energia Elétrica baseado no Padrão IEEE1451", Anais Do XX Congresso Brasileiro de Automática, Belo Horizonte, 2014.
28. Fernandes, P. G. G. "Medidor Eletrônico de Consumo de Energia Elétrica, UFRJ, 2006.
29. Moraes, P. M. "Sistema de Medição de Energia Baseado no Medidor de Energia Teridian 71M6515H", Universidade de Madeira, 2013.
30. AIROLDI, D. "Sistema de comunicação de dados pela rede elétrica, de baixo custo, aplicado a uma rede de medidores individuais de energia elétrica residencial: concepção do circuito, protótipo e testes". Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação – UNICAMP. Campinas. 2011.
31. Programa Minha Casa Melhor. Disponível em: <<https://minhacasamelhor.com.br/>>. Acesso em 29 de março de 2016.
32. LUAN, S. W.; TENG, J. H.; CHAN, S. Y.; HWANG, L. C. "Development of a smart power meter for AMI based on ZigBee communication". 2009 International Conference on Power Electronics and Drive Systems (PEDS), p. 661-665, 2009. IEEE.
33. PINHO, J. A. M. "Calibração de resultados de pesquisa de posses e hábitos pela medição eletrônica de consumo de eletrodomésticos". PUC-Rio, 2013.
34. CUSTÓDIO, E. S. "Desenvolvimento de um micromedidor inteligente para gerenciamento pelo lado da demanda em redes elétricas inteligentes". UFPR. 2013.
35. MORO, J. Z. "Medidor de consumo de energia elétrica descentralizado e com interface ao usuário". Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. UNICAMP. Campinas, 2011.
36. ZAMBIANCO, J. D. B. "Sistema para monitoramento detalhado do consumo elétrico residencial utilizando rede de sensores ZigBee". Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. UNICAMP. Campinas, 2010.
37. DUARTE, E. C. C.; PINHO, E. M.; AMAZONAS FILHO, E. M. "Digitalização de Medidores Eletromecânicos de Energia Elétrica". Instituto de Estudos Superiores da Amazônia (IESAM).
38. CURRENT TRANSFORMER JSCT-6 5(20)A/5mA. Disponível em: <<http://www.tradeindia.com/fp636114/Current-Transformer-JSCT-6-5-20-A-5mA-.html>>. Acesso em: 07 abr. 2014.
39. USER'S Guide MSP430x5xx and MSP430x6xx Family. *Texas Instruments*. Disponível em: <<http://www.ti.com/lit/ug/slau208m/slau208m.pdf>>. Acesso em: 07 abr. 2014.
40. MIXED SIGNAL MICROCONTROLLER MSP430F673x MSP430F672x. *Texas Instruments*. Disponível em: <<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/msp430f6721.pdf>>. Acesso em: 07 abr. 2014.
41. EVERLIGHT. "Technical Data Sheet Infrared Remote-control Receiver Module". Disponível em: <<http://www.aut-comp.com.br/fichas/everlight/infravermelhos/modulosreceptores/IRM-8751-P.pdf>>. Acesso em: 07 abr. 2014.

42. BACURAU, R. M. "Medidor de energia inteligente para discriminação de consumo por aparelho através de assinatura de cargas". Campinas, SP. 2014.

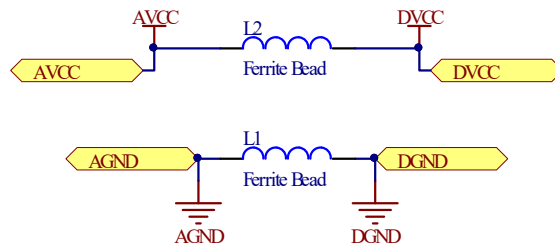
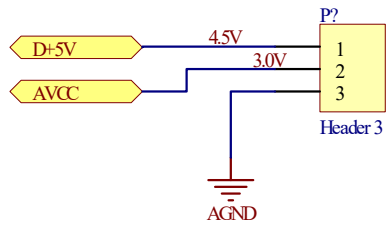
Apêndice A – Fonte e front-end do medidor desenvolvido



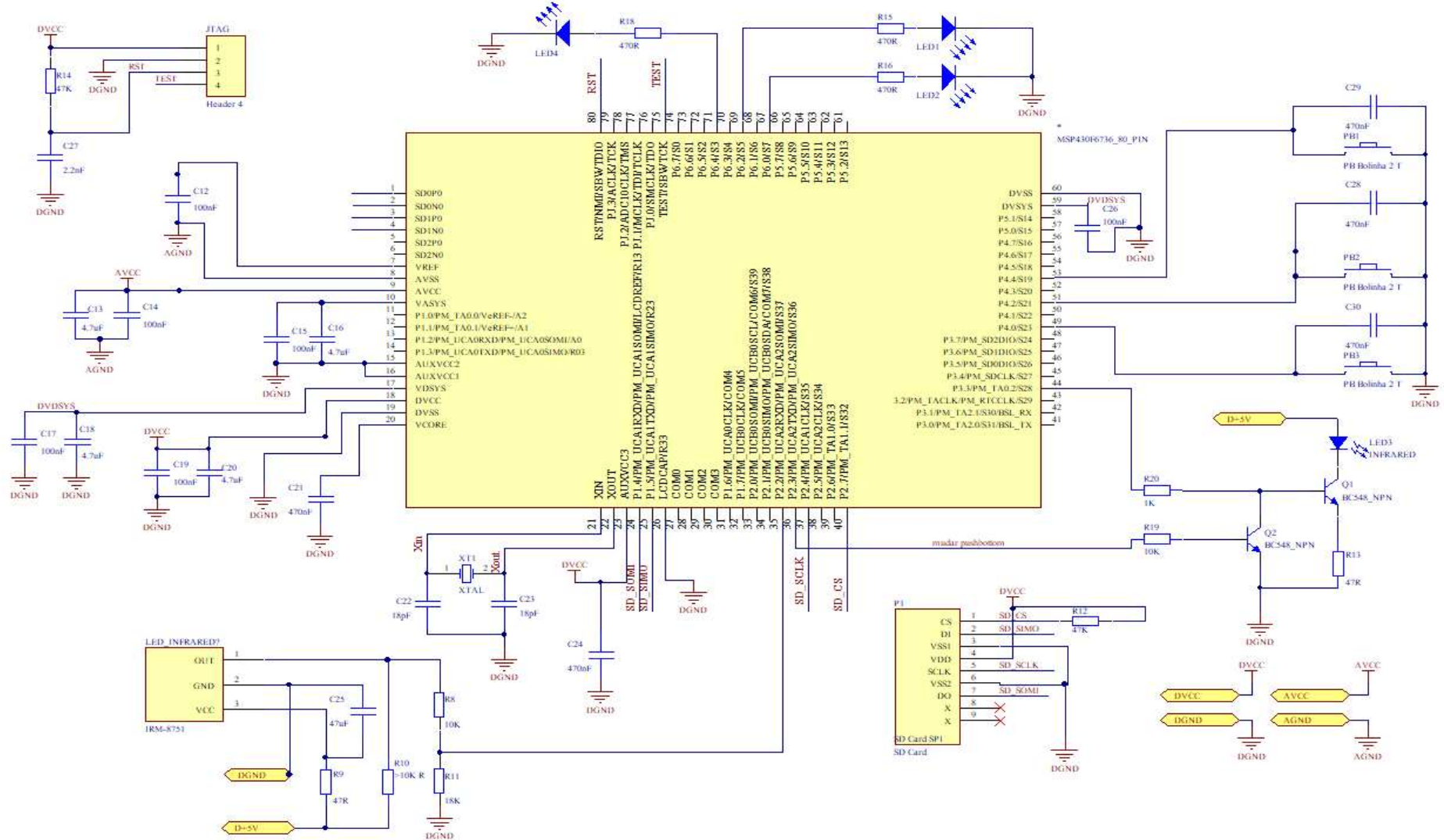
Apêndice B – Microcontrolador e componentes do medidor desenvolvido



Apêndice C – Conector da bateria do controle receptor de dados

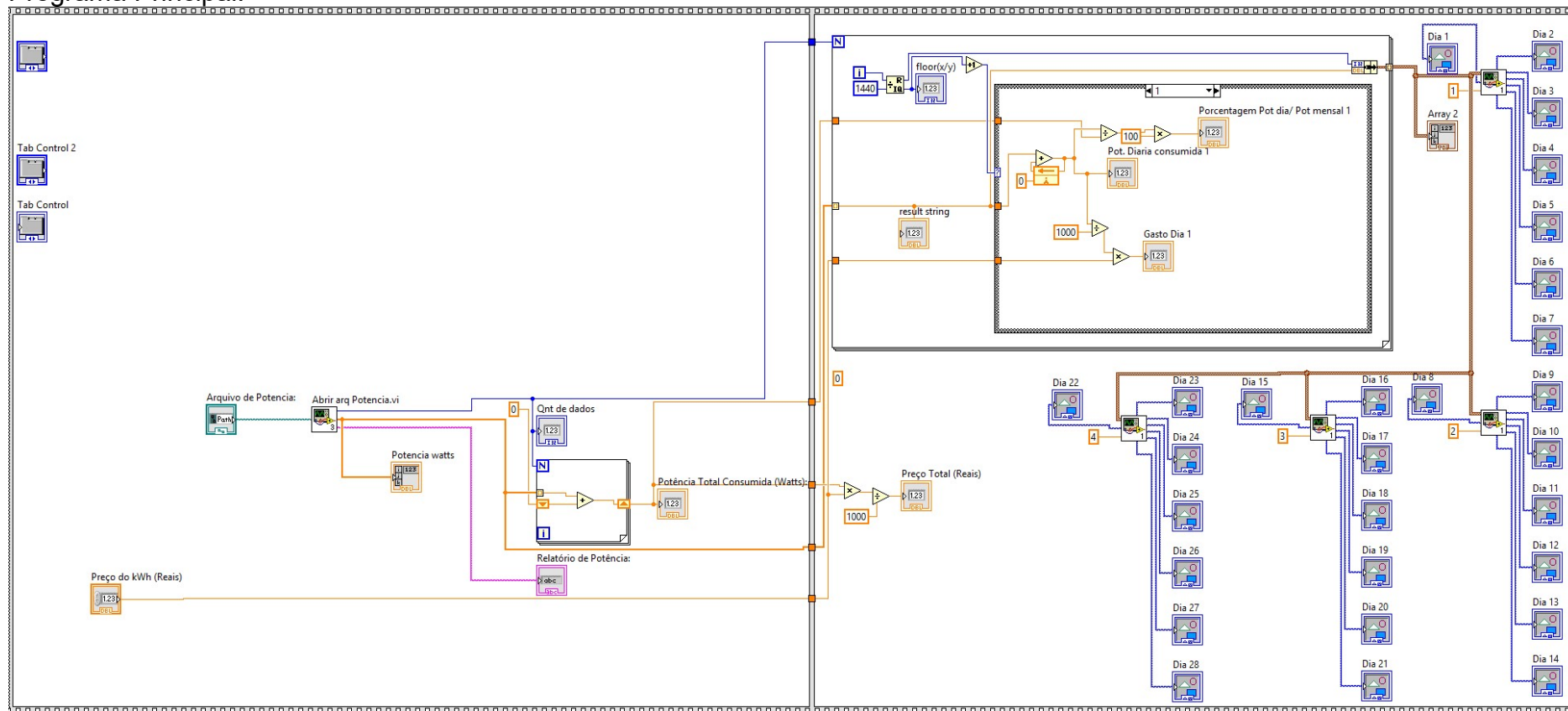


Apêndice D – Microcontrolador e componentes do controle receptor de dados

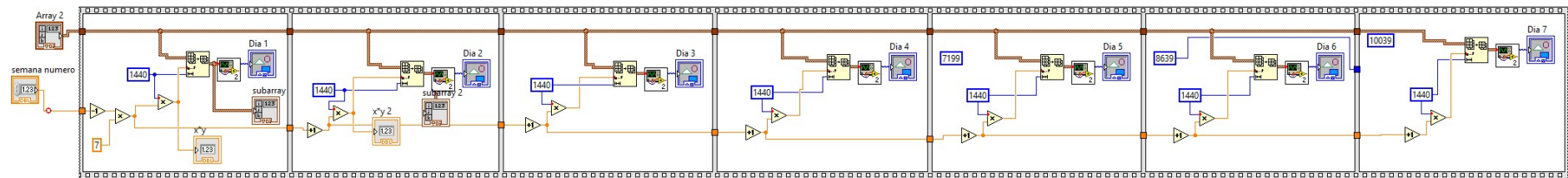


Apêndice E – Código fonte do Software desenvolvido em LabVIEW

Programa Principal:



Sub-rotina para gerar os gráficos:



Sub-rotina para abrir o relatório gerado pelo medidor e fornecer os dados separadamente:

