



Universidade Estadual de Campinas
Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação
Departamento de Eletrônica e Microeletrônica

**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.**

Autor: Douglas Airoidi

Orientador: Prof. Dr. José Antonio Siqueira Dias

Trabalho apresentado à Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da UNICAMP como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica. Área de concentração: Eletrônica, Microeletrônica e Optoeletrônica.

Campinas

2011

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA DA ÁREA DE
ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE - UNICAMP

Ai78s Airoidi, Douglas
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. / Douglas Airoidi. --Campinas, SP: [s.n.], 2011.

Orientador: José Antonio Siqueira Dias.
Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação.

1. Sistemas de transmissão de dados. 2. Comunicações digitais. I. Dias, José Antonio Siqueira. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. III. Título.

Título em Inglês: Communication system to the AC power, low cost, applied to a network of individual meters for residential electricity, circuit design, prototyping and testing.

Palavras-chave em Inglês: Data transmission systems, Digital communications

Área de concentração: Eletrônica, Microeletrônica e Optoeletrônica

Titulação: Mestre em Engenharia Elétrica

Banca examinadora: José Antonio Siqueira Dias, Rogério Lara Leite, Elnatan Chagas Ferreira

Data da defesa: 24/10/2011

Programa de Pós Graduação: Engenharia Elétrica

COMISSÃO JULGADORA - TESE DE MESTRADO

Candidato: Douglas Airoidi

Data da Defesa: 24 de outubro de 2011

Título da Tese: "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"

Prof. Dr. José Antonio Siqueira Dias (Presidente):

Dr. Rogério Lara Leite:

Prof. Dr. Elnatan Chagas Ferreira:

Ao planeta Terra que atualmente merece mais atenção, e que este projeto possa colaborar de alguma forma com a sua conservação ou que resulte em um menor impacto ambiental.

Á minha família que acredita e me apóia incondicionalmente em tudo que realizo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao professor orientador que acreditou no meu potencial ao me aceitar como seu orientado, dando oportunidade para o meu crescimento profissional e pessoal, e ao professor Dr. Elnatan Chagas Ferreira pelo auxílio nos trabalhos.

Ao SENAI, seus diretores, coordenadores e à bibliotecária Vera Lúcia Piorno Barbosa de Marcos pela colaboração e auxílio na conclusão desta etapa.

“É fazendo que se aprende a fazer aquilo que se deve aprender a fazer.”

Aristóteles

“O início da sabedoria é a admissão da própria ignorância. Todo o meu saber consiste em saber que nada sei.”

Sócrates

"Todo mundo 'pensando' em deixar um planeta melhor para nossos filhos... Quando é que 'pensarão' em deixar filhos melhores para o nosso planeta?"

Pergunta vencedora de um congresso de vida sustentável

RESUMO

Este trabalho é parte de um projeto de pesquisa e desenvolvimento de uma rede de mini-medidores de energia, de baixíssimo custo, que se comunica com uma central, que armazena todas as informações relativas ao consumo de energia elétrica, de cada um dos pontos de consumo de uma residência. Ao fim de um período, fornece ao consumidor condições de analisar a distribuição do seu gasto com energia elétrica por ponto medido. Neste trabalho foi desenvolvido um sistema de comunicação de dados pela rede elétrica, também conhecida como *Power Line Communication (PLC)*). O *hardware*, de baixo custo, é composto por microcontrolador e um modem integrado que utiliza o processo *Amplitude Shift Keying (ASK)*, com taxas de comunicação entre 600 e 1200 *bps (bits por segundo)*. O *firmware* criado é composto de um protocolo que realiza a comunicação *half-duplex* entre duas estações de medição, permitindo ao transmissor da informação, saber se a mesma foi recebida com integridade.

Palavras-chave: Sistemas de transmissão de dados. Comunicações digitais.

ABSTRACT

This work is part of a research project and develops a network of mini-power meters, very low cost, which communicate with a central, which stores all information relating to the consumption of electricity, each of the points consumption of a residence. At one time, it gives the consumer the ability to analyze the distribution of its spending power by the measured point. We have developed a communication system for data grid, also known as Power Line Communication (PLC). The hardware, low cost, consists of microcontroller and an integrated modem that uses the process Amplitude Shift Keying (ASK), with communication rates between 600 and 1200 bps (bits per second). The firmware is created consisting of a protocol that performs half-duplex communication between two measuring stations, allowing the transmitter of information, whether it was received with integrity.

Keywords: Data transmission systems. Digital communications.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação da rede de medidores sem fio	17
Figura 2 - Representação da rede sem fio com a solução PLC	18
Figura 3 - IASC Brasil e os <i>benchmarks</i> internacionais	20
Figura 4 - IASC Eletropaulo de 2000 a 2009.....	21
Figura 5 - Dimensões da pesquisa de satisfação.....	21
Figura 6 - Diagrama de blocos de um Medidor	23
Figura 7 - Medidor de energia elétrica eletromecânico	24
Figura 8 - Medidores de energia elétrica individual	25
Figura 9 - Analisador de energia elétrica.....	25
Figura 10 - Diagrama em blocos do AD 71056	26
Figura 11 - Conexão entre medidor e microcontrolador	27
Figura 12 – Diagrama esquemático do circuito do medidor	27
Figura 13 - Automatização da medição por rede.....	28
Figura 14 - Sentidos de transmissão.....	30
Figura 15 - Representação das Topologias	32
Figura 16 - Padrões de comunicação para redes residenciais.....	33
Figura 17 - Equipamentos da X-10 [12].....	37
Figura 18 - Circuitos dos módulos X-10	38
Figura 19 - Modulação ASK	39
Figura 20 - Modulação FSK.....	40
Figura 21 - Modulação PSK	40
Figura 22 - Modulação FHSS	41
Figura 23 - Modulação OOK.....	42
Figura 24 - Exemplos de modems PLC.....	44
Figura 25 - Diagrama de modem PLC.....	46
Figura 26 - Diagrama em blocos do TDA-5051 ^a	46
Figura 27 – Diagrama Esquemático Sugerido pelo fabricante	47
Figura 28 - Circuito de acoplamento e filtragem.....	48

Figura 29 - Ondas da simulação do circuito de entrada	49
Figura 30 - Modem PLC	50
Figura 31 – Diagrama Esquemático do modem PLC	51
Figura 32 – Layout do modem PLC.....	51
Figura 33 – <i>Frames</i> do protocolo	53
Figura 34 - Fluxograma do programa principal do transmissor	54
Figura 35 - Fluxograma da Interrupção TIMER2 do transmissor.....	55
Figura 36 - Fluxograma da Interrupção USART-TX do transmissor.....	56
Figura 37 - Fluxograma da Interrupção USART-RX do transmissor	57
Figura 38 - Fluxograma do programa principal do receptor	58
Figura 39 - Fluxograma da Interrupção TIMER2 do receptor	59
Figura 40 - Fluxograma da Interrupção USART-TX do receptor	60
Figura 41 - Fluxograma da Interrupção USART-RX do receptor.....	60
Figura 42 - Diagrama em blocos AVRRAVEN.....	61
Figura 43 - Módulo AVRRAVEN – frente	62
Figura 44 - Módulo AVRRAVEN – traseira.....	62
Figura 45 - Diagrama em blocos do RZUBSTICK.....	63
Figura 46 – Módulo RZUBSTICK	63
Figura 47 - Módulo PLC – 2º protótipo	64
Figura 48 - Diagrama esquemático do modem PLC – 2º protótipo	65
Figura 49 - Módulo tomada sem o kit AVRRAVEN	66
Figura 50 - Módulo tomada com o kit AVRRAVEN	67
Figura 51- Diagrama esquemático do módulo tomada.....	68
Figura 52 - Módulo Luminária.....	69
Figura 53 - Diagrama esquemático do módulo luminária	70
Figura 54 - Módulo luminária com o kit AVRRAVEN.....	71
Figura 55 - Módulo chuveiro.....	72
Figura 56 - Módulo chuveiro com kit AVRRAVEN.....	72
Figura 57 - Diagrama esquemático do módulo chuveiro	73
Figura 58 - Área de trabalho do software Proteus.....	75
Figura 59 - Osciloscópio do simulador Proteus	76

Figura 60 - Osciloscópio simulando falha.....	77
Figura 61 - Teste de comunicação em <i>proto-board</i>	78
Figura 62 - Portadora do modem PLC	79
Figura 63 - Portadora sobre a tensão da rede.....	79
Figura 64 - Comunicação entre modems	80
Figura 65 - Planta da residência utilizada nos testes	82
Figura 66 - Conta de energia de fevereiro da residência B	85
Figura 67 - Conta de energia de março da residência B	86

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Comparativo das tecnologias existentes para redes residenciais.....	34
Tabela 2 - Comparativo entre tecnologias sem fio	35
Tabela 3 - Comparação entre técnicas de modulação.	42
Tabela 4 - Fabricantes e seus CIs para PLC	45
Tabela 5 - Resultados dos testes práticos	81
Tabela 6 - Resultados obtidos na residência A	84
Tabela 7 - Economia na residência B.....	85

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ACSI	<i>American Consumer Satisfaction Index</i>
ANEEL	Agencia Nacional de Energia Elétrica
ASK	<i>Amplitude Shift Keying</i> : chaveamento por amplitude
Bps	<i>Bit per second</i> : bit por segundo
CATV	Cabo de TV
CI	Circuito Integrado
CRC	<i>Cyclic Redundancy Check</i>
DEMIC	Departamento de Eletrônica e Microeletrônica
DSSS	<i>Direct Sequence Spread Spectrum</i>
Eletropaulo	Eletricidade de São Paulo S.A
FHSS	<i>Frequency Hopping Spread Spectrum</i>
FSK	<i>Frequency Shift Keying</i> : chaveamento por frequência
HKCSI	<i>Hong Kong Consumer Satisfaction Index</i>
Hz	Unidade de frequência, Hertz
IASC	Índice Aneel de Satisfação do Consumidor
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
KWh	Quilowatt-hora
OOK	<i>On Off Keying</i>
PLC	<i>Power Line Communication</i> : comunicação pela rede elétrica.
PNA	<i>Phoneline Networking Alliance</i>
PSK	<i>Phase Shift Keying</i>
RF	Rádio frequência
SMD	<i>Surface mount device</i>
Unicamp	Universidade de Campinas
USART	<i>Universal Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter</i>
USB	<i>Universal Serial Bus</i>
V	Volts
Wi-Fi	<i>Wireless Fidelity</i>
Ω	Resistência elétrica, Ω

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 Motivação.....	18
1.2 Objetivo.....	22
2 MEDIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA	23
3 COLETA E CONCENTRAÇÃO DAS MEDIÇÕES.....	28
3.1 Redes de Comunicação	29
3.1.1 Introdução	29
3.1.2 Sentido de transmissão.....	29
3.1.3 Topologia de redes.....	31
3.2 Redes de Comunicação Residenciais.....	32
3.3 A Tecnologia ZigBee	35
3.4 A Tecnologia PLC	36
4 DESENVOLVIMENTO DO PROJETO	43
4.1 Introdução	43
4.2 Módulo PLC.....	43
5 PROJETO “<i>BREAKDOWN</i>” – VISÃO GERAL	61
5.1 Módulo ZigBee	61
5.2 Módulo PLC	64
5.3 Módulo Tomada	66
5.4 Módulo Luminária.....	69
5.5 Módulo Chuveiro	71
6 RESULTADOS EXPERIMENTAIS	74
6.1 Introdução	74
6.2 Primeira fase (simulações).....	74
6.3 Segunda fase (testes em laboratório)	77
6.4 Terceira fase (testes em residência)	80
6.5 Testes e resultados do projeto Breakdown	83
7 CONCLUSÃO	87

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	88
APÊNDICE A – <i>FIRMWARE</i> DO TRANSMISSOR	90
APÊNDICE B – <i>FIRMWARE</i> DO RECEPTOR	95

1 INTRODUÇÃO

A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), e a concessionária Metropolitana de Eletricidade de São Paulo S/A (ELETROPAULO), contrataram a Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade de Campinas (Unicamp), através do Departamento de Eletrônica e Microeletrônica (DEMIC), para realização do chamado “Projeto *Breakdown* do consumo de energia elétrica”.

Trata-se de um estudo sobre o consumo da energia elétrica residencial, individualizado por equipamento, contemplando o projeto e execução de uma rede sem fio de medidores de energia elétrica que se comunica entre si e com uma central que, por sua vez, armazena o total de consumo de cada ponto de medição e ao final de um período, exibe um relatório discriminado para análise do consumidor final.

Conhecemos as vantagens e facilidades da comunicação sem fio, mas esta pode apresentar certa deficiência quando a distância entre transmissor e receptor ultrapassa o alcance do mesmo. Outra deficiência comum é na transposição de barreiras como concreto e aço, capazes de prejudicar a comunicação, causando atenuação dos sinais de rádio frequência (RF).

Para solucionar estes problemas, mas ainda sem perder o foco da proposta inicial, idealizou-se um sistema de comunicação de dados pela rede elétrica, que não objetiva substituir a rede sem fio, mas sim integrar-se como um recurso alternativo, mantendo a comunicação quando não for possível por RF devido às deficiências apresentadas anteriormente.

Este trabalho contempla o projeto de *hardware* de um modem *Power Line Communication* (PLC) e um *firmware* com protocolo de comunicação seguro, bem como a confecção de protótipos funcionais visando à integração do sistema.

Na Figura 1 temos uma representação do sistema utilizando apenas a comunicação sem fio.

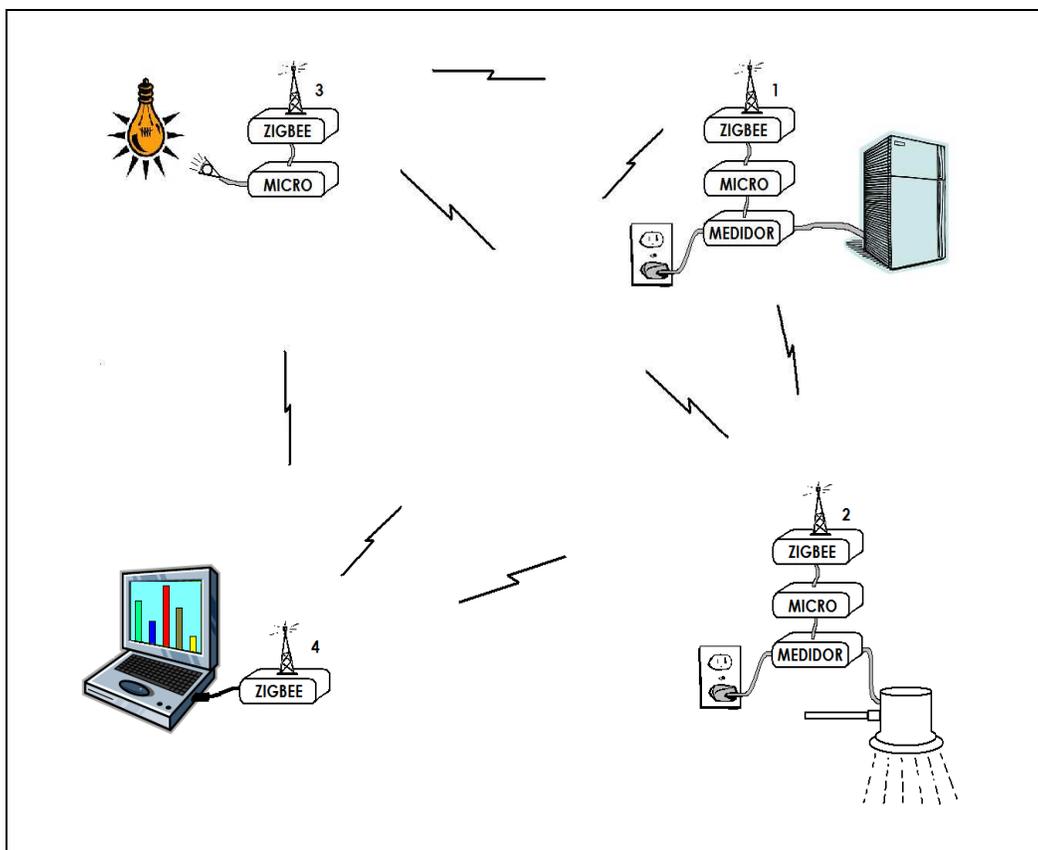


Figura 1 - Representação da rede de medidores sem fio

Fonte: Dados do autor

Note que os rádios 1, 2, 3 e 4 se comunicam entre si, formando uma rede onde todos os medidores podem se comunicar direta ou indiretamente com a central de armazenamento. Na Figura 2, foi representada uma barreira entre os rádios e a idealização da solução através do PLC. A barreira aqui representada pode ser a grande distância ou obstáculos como paredes e lajes entre os rádios. Na representação, os rádios 1 e 2 comunicam-se entre si, mas não diretamente com a central, necessitando assim utilizar o modem PLC ligado ao rádio 3 para conectá-los ao restante da rede.

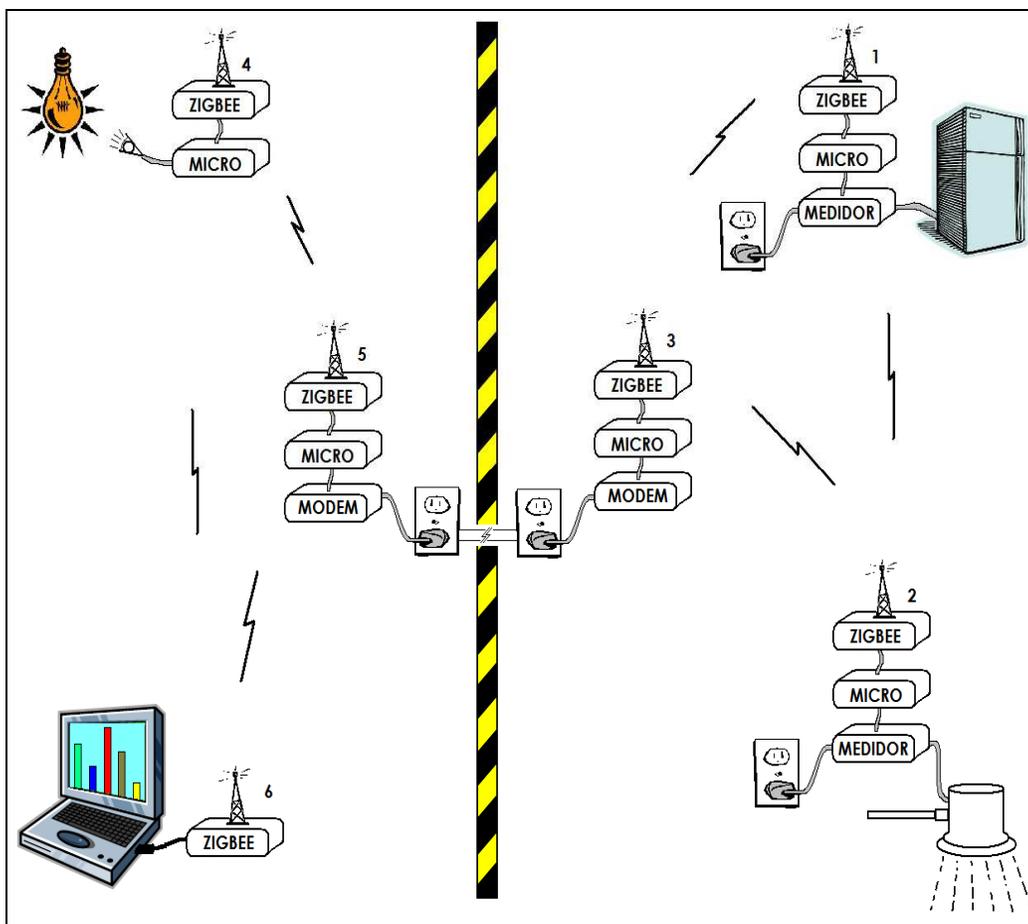


Figura 2 - Representação da rede sem fio com a solução PLC

Fonte: Dados do autor

1.1 Motivação

Toda alteração na natureza e a maioria das atividades humanas causam algum tipo de impacto negativo para o meio ambiente e, as atividades do setor elétrico têm uma parcela neste resultado.

A matriz energética do Brasil é composta em sua maioria de hidrelétricas, mas também há a geração proveniente de usinas nucleares e térmicas. Todas contribuem com impactos ao meio ambiente.

Tornamo-nos cada vez mais dependentes do uso da energia elétrica e é óbvio que quanto maior seu consumo, maior o impacto ambiental. É possível economizá-la através do uso consciente e de bons hábitos.

Aproveitar a iluminação natural, desligar equipamentos e iluminação quando não utilizados, manter a instalação sempre adequada (sem fuga ou mau contato), substituir equipamentos antigos por mais eficientes, diminuir o tempo de banho, fazem parte dos bons hábitos, mas a maior parte da população consumidora não tem conhecimento específico para realizar tal avaliação.

O conhecimento sobre o consumo de energia elétrica de cada lâmpada, equipamento ou eletrodoméstico sempre foi um desejo dos consumidores residenciais. Tal conhecimento permitiria detectar várias causas de consumo excessivo e oneroso como:

- a) equipamentos e eletrodomésticos defeituosos;
- b) fuga de corrente devido a instalações danificadas;
- c) aquecimento indesejado de fios e cabos devido ao mau dimensionamento das instalações elétricas;
- d) baixa eficiência de equipamentos e eletrodomésticos;
- e) uso excessivo do chuveiro;
- f) má utilização da iluminação, entre outras.

Esta informação seria de grande valia para a maioria dos consumidores poderem analisar o perfil de seu consumo e tomar decisões a fim de economizar, diminuir seus gastos e reduzir o impacto ambiental.

Não seria difícil realizar uma análise dessas. Contudo, não seria prático nem barato, pois exigiria uma grande quantidade de equipamentos medidores/analísadores de energia dotados de memória de massa, e profissional habilitado para instalá-los, coletar e interpretar os resultados.

Isso obviamente inviabilizaria a análise por parte do consumidor, devido ao custo entre outros inconvenientes.

A ANEEL [1], que regulamenta as concessionárias de fornecimento de energia elétrica no Brasil, realiza anualmente a pesquisa do Índice ANEEL de Satisfação do Consumidor (IASC) [3], que resulta em um relatório. Desta forma, cada concessionária pode avaliar os serviços ofertados a partir da percepção do seu consumidor e aprimorá-los. O relatório analisado foi o de avaliação da satisfação do consumidor residencial com a ELETROPAULO [2] no ano de 2009.

Este relatório apresenta ainda uma comparação com resultados de anos anteriores e um *benchmark* com outros índices internacionais como: *American Consumer Satisfaction Index (ACSI)* de 2009 e o *Hong Kong Consumer Satisfaction Index (HKCSI)* de 2008 para empresas de energia elétrica de Hong Kong. Na Figura 3, vemos um gráfico com resultados para todas as concessionárias atuantes no Brasil:

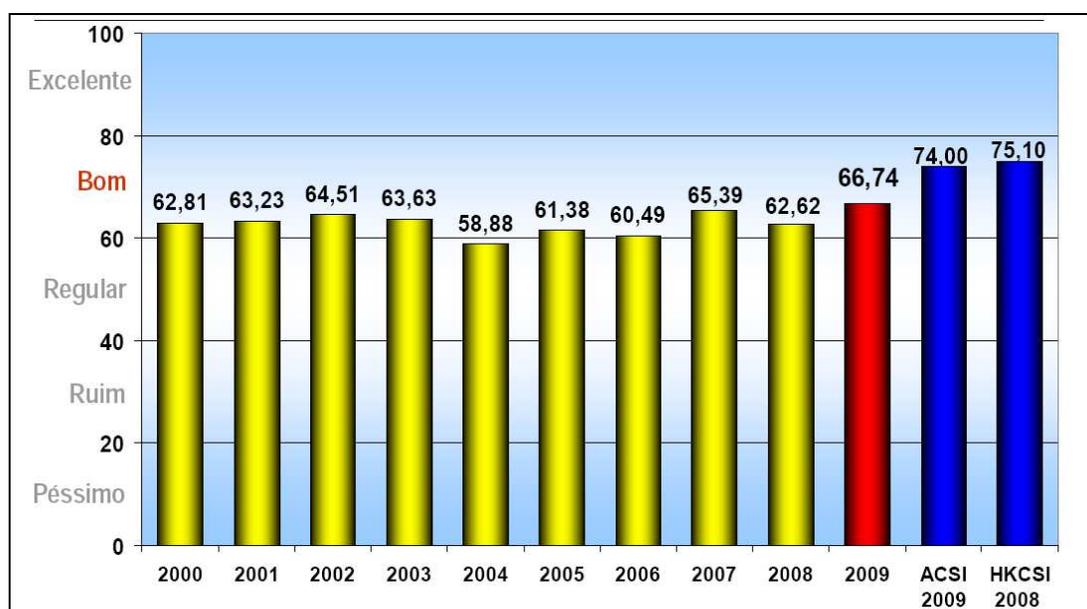


Figura 3 - IASC Brasil e os *benchmarks* internacionais

Fonte: ANEEL, (2009, p.17)

Na Figura 4, temos o resultado da Eletropaulo, comparado aos anos anteriores, mostrando um crescimento significativo.

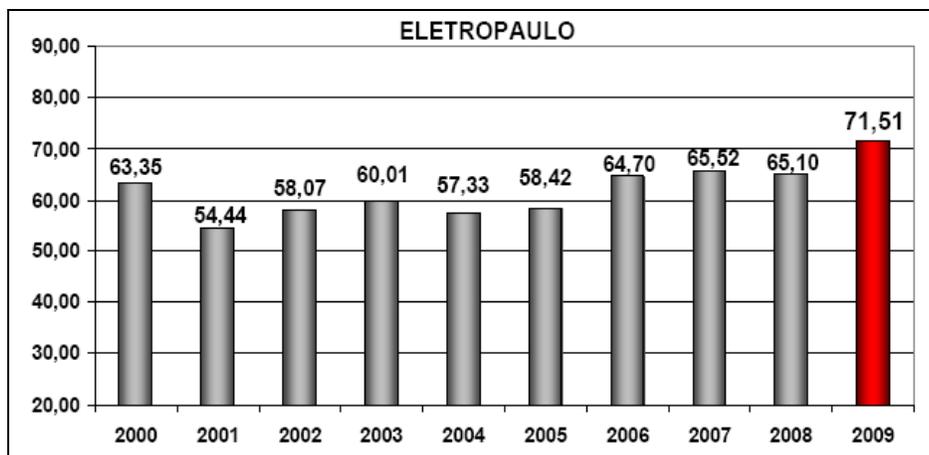


Figura 4 - IASC Eletropaulo de 2000 a 2009

Fonte: ANEEL. (2009, p. 17)

Como podemos observar o índice global de satisfação com a Eletropaulo vem aumentando perante anos anteriores e é maior que o índice IASC – Brasil mostrado na Figura 3. Muitas são as dimensões desta pesquisa da satisfação do cliente com relação ao fornecimento da energia pela concessionária como visto no modelo da Figura 5.

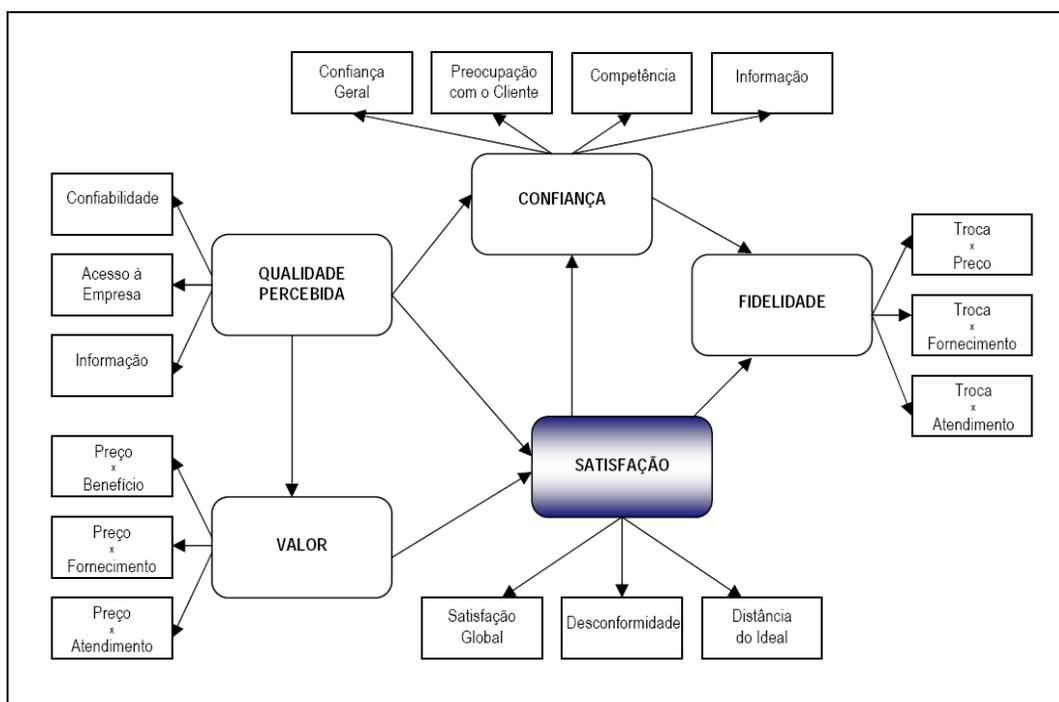


Figura 5 - Dimensões da pesquisa de satisfação

Fonte: ANEEL, (2009, p.9)

Analisando o gráfico da Figura 5, percebemos que o valor pago pelo consumidor influi diretamente no índice da sua satisfação. A falta de conhecimento técnico sobre o assunto e como é a distribuição do consumo de sua residência, influencia na sua satisfação e impacta neste resultado.

Mesmo diante do crescimento da satisfação dos clientes, a concessionária referida contratou esta universidade para realização do chamado “Projeto *Breakdown* do consumo de energia elétrica”, visando atender o Programa Anual de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico – ciclo 2006/2007, aprovado pela ANEEL.

1.2 Objetivo

O projeto *Breakdown* propõe a construção de um sistema de medição de baixo custo, fácil instalação, que forneça uma análise detalhada e de fácil compreensão do consumo de cada ponto de energia elétrica ao consumidor residencial. O sistema deve ainda oferecer um perfil detalhado do consumo, para que o usuário possa analisar de que forma é composta sua conta de energia elétrica. Desta forma ele será capaz entender sua distribuição de gastos e de implementar ações para um melhor aproveitamento da energia elétrica fornecida pela concessionária.

O objetivo deste trabalho é idealizar, projetar, construir e testar um sistema de comunicação de dados que possa solucionar possíveis problemas de comunicação de dados na rede sem fio utilizada na idéia inicial projeto *Breakdown*, sem a intenção de substituí-la, mas sim acrescentar um recurso se necessário.

Para atingir o objetivo, dividiu-se o projeto em segmentos que estudaremos separadamente, sem perder o foco principal. Assim sendo, os segmentos a serem definidos são:

- a) medição de energia elétrica;
- b) coleta e concentração das medições.

Após estas definições, serão apresentados o projeto das partes, simulações, confecção dos circuitos protótipos e testes em bancada.

2 MEDIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

O medidor de energia elétrica é um dispositivo ou equipamento capaz de mensurar o consumo de energia elétrica de uma carga. O medidor é inserido entre a rede de energia elétrica e a carga, conforme representado na Figura 6. Normalmente é utilizada a unidade quilowatt-hora – KWh para o registro deste consumo.

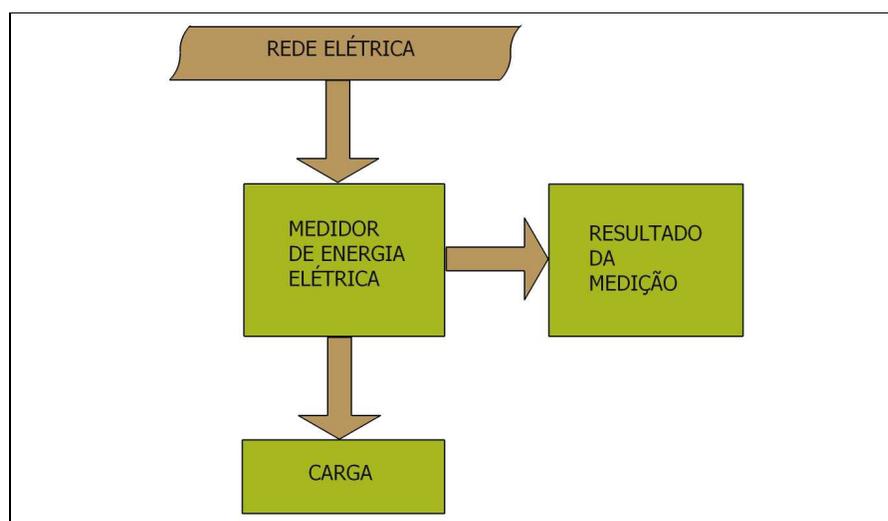


Figura 6 - Diagrama de blocos de um Medidor

Fonte: Dados do autor

O consumo é obtido através da multiplicação entre a tensão fornecida à carga, a corrente consumida por ela e a duração deste consumo. Para realização desta medição, os medidores devem ter um sensor de corrente, um de tensão e uma base de tempo. O resultado deve ser armazenado em memória não volátil para uma posterior leitura. Os medidores podem ser:

- a) eletromecânicos;
- b) eletrônicos.

As concessionárias de energia elétrica mantêm instalados medidores localizados na entrada do ponto de fornecimento de energia elétrica dos consumidores

residenciais, com a finalidade de registrar o total do consumo. Atualmente a maior parte dos medidores de energia residencial é do tipo eletromecânico [4], conforme Figura 7, o que exige a visita mensal de um funcionário da empresa. Embora existam vários estudos para automatização desta leitura, isto demandaria um grande investimento, já que os medidores teriam que ser substituídos por medidores eletrônicos, com redes de comunicação entre as residências e a concessionária, implementadas pela própria rede elétrica, por linha telefônica, por cabo de TV (CATV) ou via RF.



Figura 7 - Medidor de energia elétrica eletromecânico

Fonte: Nansen (2010)

Existem outros tipos de medidores que podem ser instalados em tomadas para a medição direta de uma carga ligada a sua tomada [5], como mostra a Figura 8 ou um analisador de energia ligado ao quadro de distribuição [6] como na Figura 9. Mas tais medidores não poderiam ser utilizados neste projeto, pois ele deve ter como principais características:

- a) baixo custo de fabricação;
- b) dimensões reduzidas;
- c) armazenamento da medição em memória de massa;
- d) capacidade de comunicação em rede.



Figura 8 - Medidores de energia elétrica individual

Fonte: P3 International Corporation (c2010).



Figura 9 - Analisador de energia elétrica

Fonte: Instrutherm (2010)

Para atender estas necessidades, o tipo de medidor escolhido foi o eletrônico. Após pesquisa de fabricantes de circuitos integrados, o componente escolhido foi o AD71056 fabricado pela *Analog Devices* [7].

No diagrama de blocos do componente que é mostrado na Figura 10, podemos verificar que V2P e V2N são entradas para medição por amostragem da tensão e V1P e V1N são as entradas para medição por amostragem da corrente. Ambas as entradas passam por um conversor analógico-digital para posterior multiplicação, mas a corrente passa por um estágio de correção de fase, tendo em vista que algumas cargas podem provocar defasagem entre tensão e corrente.

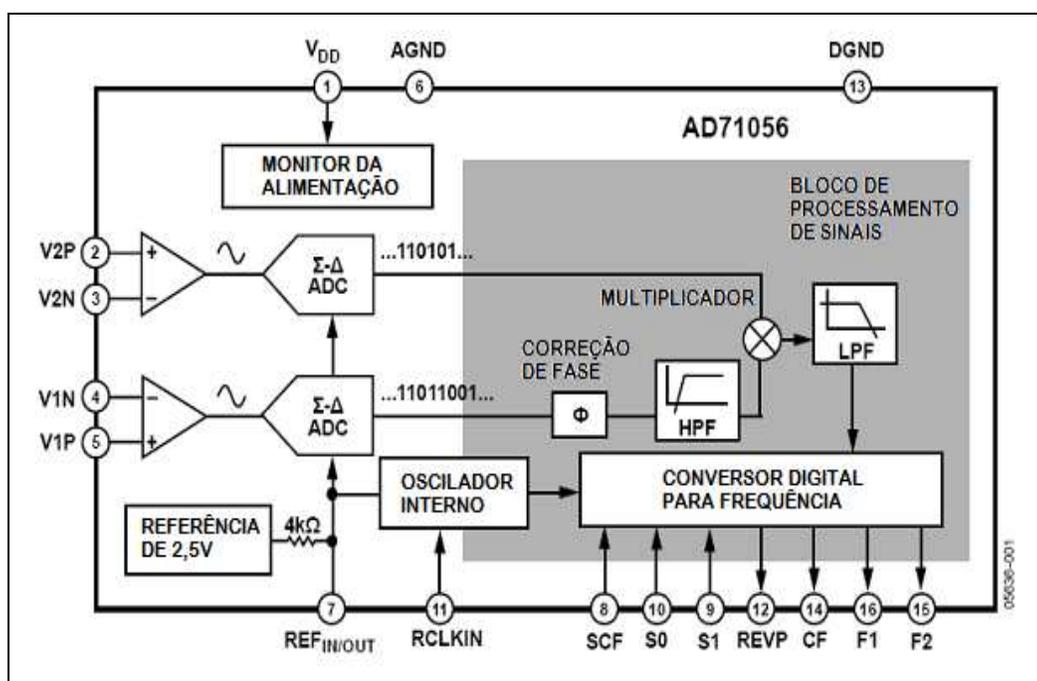


Figura 10 - Diagrama em blocos do AD 71056

Fonte: Analog Devices (2006, p.1)

Após a multiplicação e devida filtragem, um conversor transforma o valor numérico em pulsos, numa frequência diretamente proporcional ao consumo medido. Esta sequência de pulsos pode ser facilmente registrada por um microcontrolador como mostrado na Figura 11.

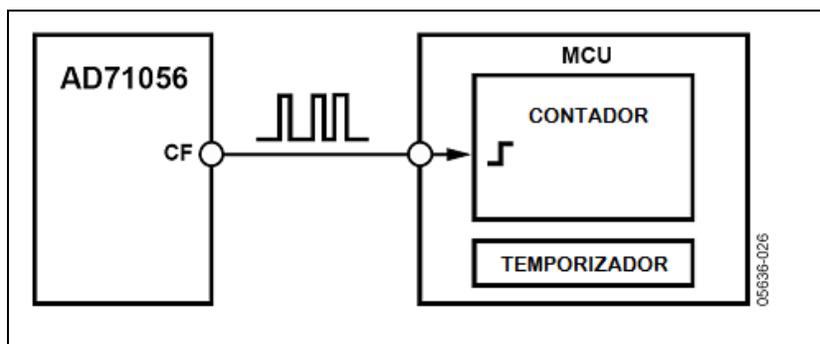


Figura 11 - Conexão entre medidor e microcontrolador

Fonte: Analog Devices (2006, p.14)

O diagrama esquemático do circuito utilizado é apresentado na Figura 12 e nele podemos ver que a amostragem de tensão é feita por um divisor de tensão e que a de corrente utiliza um resistor *shunt*. Na saída dos pulsos foi adicionado um acoplador óptico para isolar possíveis diferenças entre as referências dos circuitos.

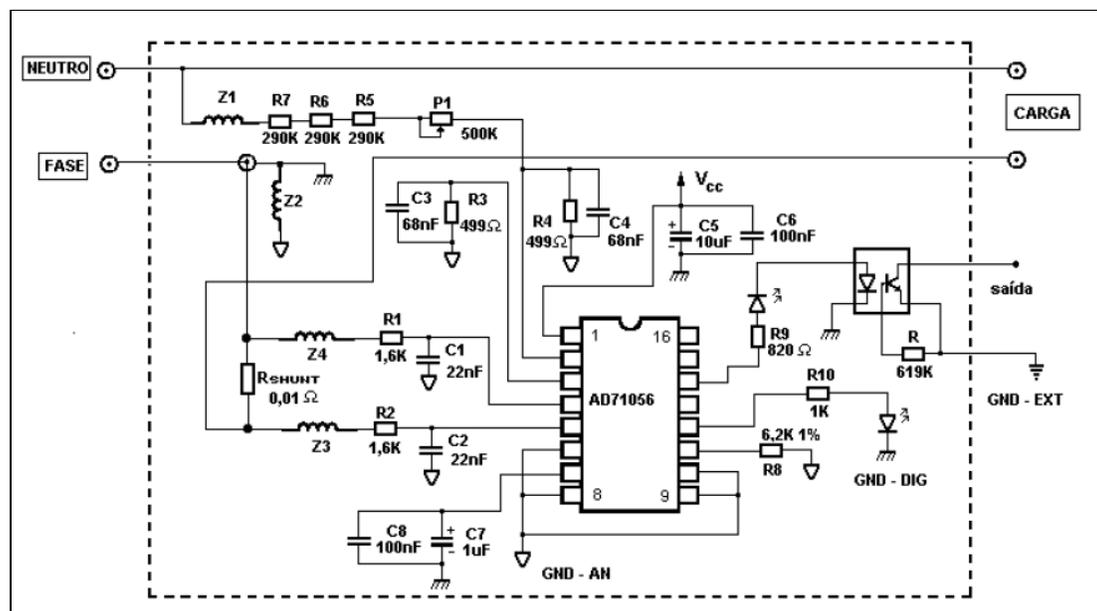


Figura 12 – Diagrama esquemático do circuito do medidor

Fonte: Analog Devices (2006)

3 COLETA E CONCENTRAÇÃO DAS MEDIÇÕES

Para o consumidor realizar uma análise detalhada do seu consumo, as medições devem ser concentradas em uma única mídia. Para isso, a coleta dos dados pode ser:

- a) manual;
- b) automatizada.

A leitura manual não seria prática e isso diverge dos nossos objetivos. A única escolha, portanto é a automatização dessa operação através de uma rede, conforme representado na Figura 13. Uma rede poderia fácil e automaticamente concentrar todas as leituras dos medidores para uma posterior análise. Essa rede deve atender os objetivos, sendo de fácil instalação, manuseio e baixo custo.

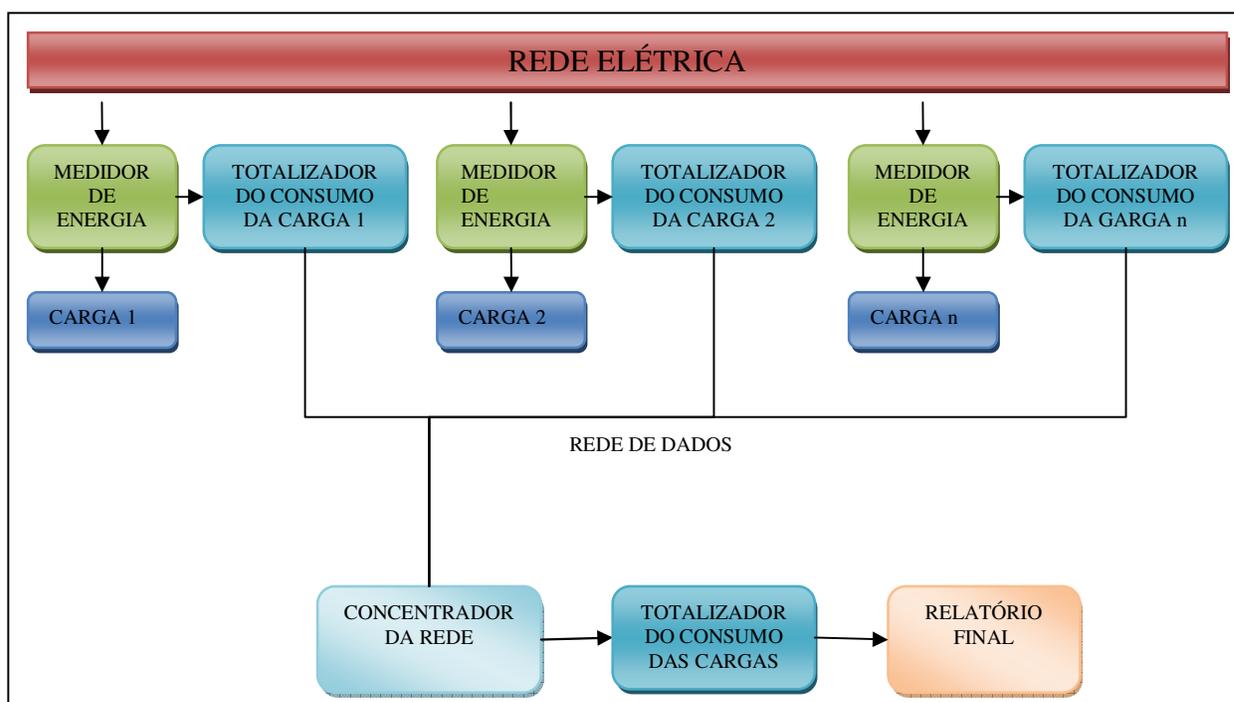


Figura 13 - Automação da medição por rede

Fonte: Dados do autor

3.1 Redes de Comunicação

3.1.1 Introdução

Uma rede de comunicação é a maneira encontrada para o envio de dados ou comandos entre computadores, impressoras ou outros dispositivos. Atualmente as redes vêm se tornando cada vez mais utilizadas em lugares como escolas, *shopping centers*, empresas e residências. As tecnologias empregadas são as mais variadas e as finalidades variam entre automação e controle, aprendizado, segurança e entretenimento [8].

Em uma comunicação de qualquer natureza ou finalidade, a informação a ser transmitida é o principal componente e todas as atenções devem estar voltadas para garantir sua entrega e integridade. Para estabelecer uma rede de comunicação, existem vários aspectos a serem observados como:

- a) informação a ser transmitida;
- b) transmissor;
- c) receptor;
- d) protocolo da comunicação;
- e) meio ou canal da transmissão.

3.1.2 Sentido de transmissão

A transmissão de dados entre dois pontos pode ser realizada de várias formas, onde a necessidade, velocidade e o meio determinarão qual tecnologia será empregada. O sentido de uma transmissão está relacionado com a tecnologia e o meio físico que interliga os comunicadores e os tipos de transmissão são conhecidos como:

- a) *simplex*, onde os dados trafegam em um único sentido, saindo do transmissor e chegando ao receptor, ou seja, só um transmite e o outro recebe, sendo que suas funções não se invertem;
- b) *half duplex*, onde há a comunicação entre os pontos em ambos os sentidos, mas elas acontecem em tempos diferentes, ou seja, quando há transmissão não há recepção e vice versa;
- c) *full duplex*, onde há comunicação nos dois sentidos e elas podem acontecer simultaneamente. Podemos verificar na Figura 14 a representação dos sentidos de transmissão.

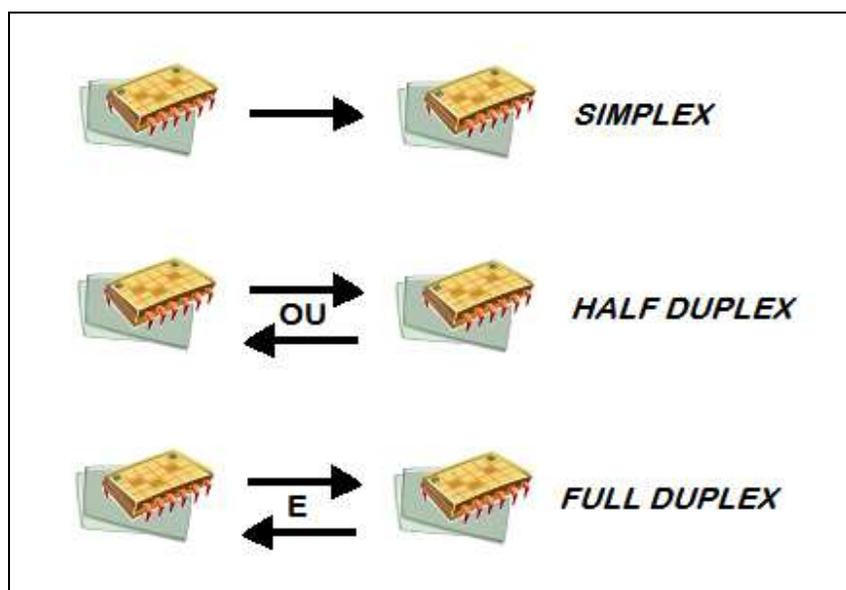


Figura 14 - Sentidos de transmissão

Fonte: Dados do autor

3.1.3 Topologia de redes

De acordo com Tanenbaum (2003) topologia é a maneira como computadores, impressoras e outros dispositivos são conectados entre si, formando uma rede. A topologia de uma rede de comunicação está relacionada aos enlaces existentes entre seus nós e, conforme sua organização possibilita diferentes configurações. As mais utilizadas são:

- a) ponto a ponto, também conhecida por *peer-to-peer*, onde apenas dois dispositivos se comunicam;
- b) barramento, também conhecida por *bus*, é a topologia onde a comunicação dos dispositivos acontece por um único caminho e, portanto, só existem dois dispositivos se comunicando ao mesmo tempo. Está sujeita a colisões de dados e os ruídos podem atrapalhar a comunicação. Se houver falha de um dispositivo, a rede continua funcionando;
- c) anel, também conhecida por *ring*, onde a comunicação entre os dispositivos acontece em um único sentido, sendo que cada dispositivo recebe a informação, analisa e repassa caso não seja endereçada a ele. Não está sujeita a colisões e não possui redundância nas informações, mas se houver falha em um dispositivo não há mais comunicação;
- d) estrela, também conhecida por *star*, onde todos os dispositivos se comunicam com um dispositivo central. Não está sujeita a colisões e possui uma grande redundância nas informações. Se houver falhas em dispositivos, continua funcionando, exceto se a falha for no dispositivo central;
- e) árvore, também conhecida por *hierarchical*, é semelhante à estrela, mas não há um dispositivo central;
- f) malha, também conhecida por *mesh*, é a topologia capaz de fazer todos os dispositivos se comunicarem entre si. Possui a maior redundância e, portanto, maior confiabilidade dentre todas as topologias. Se houver falha em um dispositivo, o caminho é refeito através de outro dispositivo conectado.

A Figura 15 ilustra as redes aqui comentadas, embora existam outras variações de redes híbridas.

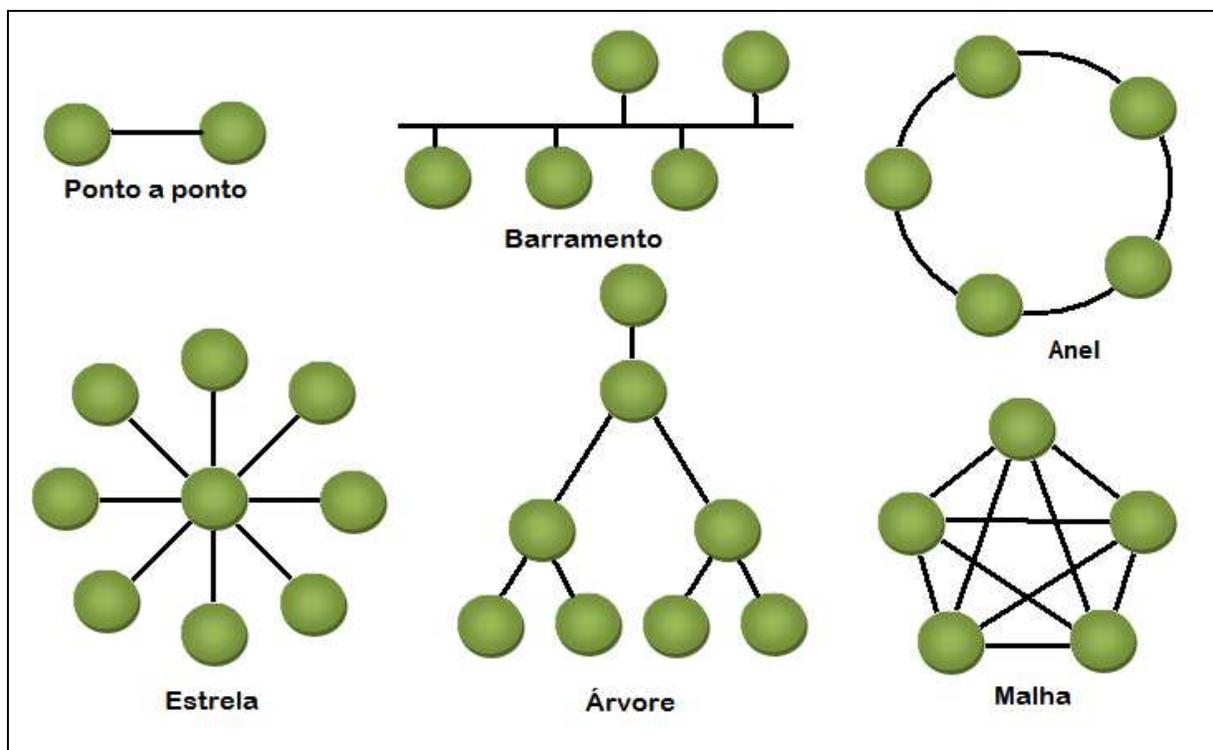


Figura 15 - Representação das Topologias

Fonte: Dados do autor

Como nosso objetivo é a construção de uma rede de comunicação em uma residência, vamos então pesquisar as tecnologias existentes e verificar qual melhor se adéqua ao nosso propósito.

3.2 Redes de Comunicação Residenciais

A automação residencial, também conhecida por domótica, tem tido um desenvolvimento significativo voltado para a otimização de lares, escritórios e

indústrias, com intenção de aumentar o conforto, melhorar a comunicação, a segurança e reduzir o consumo de energia [9].

Os sistemas aplicados à automação residencial vêm sendo utilizados desde a década de 70, mas cada um realizando funções distintas, voltados para atender um ou outro segmento específico, sem convergência para uma única padronização. Atualmente, encontramos os meios conforme Figura 16.

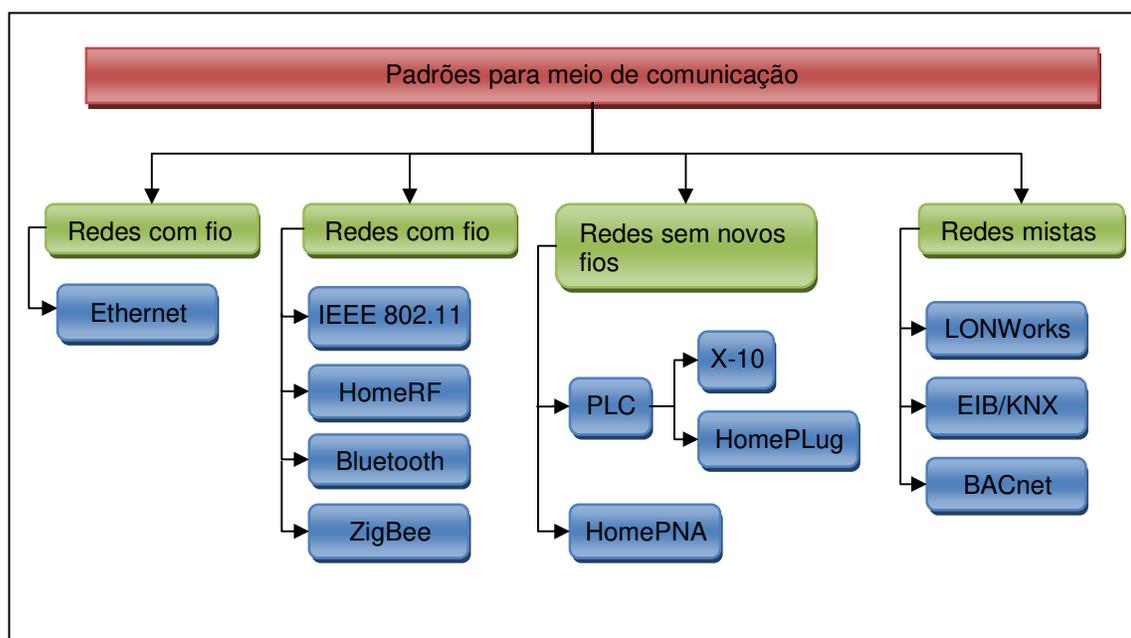


Figura 16 - Padrões de comunicação para redes residenciais

Fonte: Dados do autor

Como a maior parte das residências atualmente não possui qualquer preparação para uma rede de comunicação de dados, é necessário fazer uma análise das tecnologias existentes e verificar qual se aplica melhor à necessidade do projeto. Esta comparação é apresentada na Tabela 1.

Tabela 1 - Comparativo das tecnologias existentes para redes residenciais

Tipo de rede	Meio de transmissão	Taxa de Comunicação	Implantação	Custo	Observação
Ethernet	Com fio (cabos próprio).	Até 1000Mbps	Difícil	Alto	Melhor para novas instalações.
IEEE 802.11 (Wi-Fi)	Sem fio.	54 Mbps	Fácil	Alto	Melhor para alto tráfego de dados.
Home RF		1Mbps	Fácil	Médio	
Bluetooth		1Mbps	Fácil	Médio	Alcance de 1 a 100m
Zigbee		250Kbps	Fácil	Baixo	Consumo red. e alcance de 10 a 70m.
PLC	Com fio (rede elétrica existente).	1200bps	Fácil	Baixo	Não necessita instalação especializada.
Home PNA	Com fio (rede de telefonia).	320Mbps	Difícil para os padrões brasileiros.	Alto	Melhor para novas instalações.
LONWorks	Misto (par trançado, rede elétrica, fibra ótica ou RF)	1,25Mbps	Fácil para rede elétrica ou par trançado.	Alto	Alto custo de implantação.
EIB/KNX		100Mbps		Alto	Melhor para novas instalações.
BACnet		100Mbps		Alto	Propõe integrar tecnologias existentes.

Fonte: Dados do autor

Das tecnologias existentes atualmente para redes residenciais, conclui-se que não há equipamento pronto de baixo custo e fácil implantação que se adéqua à necessidade do projeto. Como a taxa de transferência de dados necessária é relativamente baixa, a escolha da tecnologia será pelo custo e facilidade de implantação.

3.3 A Tecnologia ZigBee

ZigBee [10] é uma norma técnica que foi criada por um grupo composto de empresas de tecnologia internacionais. Esta norma surgiu como resultado da lacuna gerada por outras tecnologias “*wireless*”. O que faltava era uma tecnologia de comunicações para baixas taxas de transmissão e baixo consumo. Por exemplo, um sensor ou um atuador pode precisar enviar apenas alguns *Bytes* esporadicamente para indicar seu estado ou acionar um atuador, sem a necessidade do envio de um fluxo constante de dados. Esta maior capacidade de Banda requer uma maior complexidade na eletrônica e consequentemente um custo mais elevado.

Poderíamos utilizar *Wireless Fidelity* (Wi-Fi), mas é como utilizar um ônibus para transportar um único passageiro, ou seja, uma subutilização da tecnologia. A Tabela 2 compara apenas as tecnologias sem fio que poderiam ser utilizadas em uma automação residencial.

Tabela 2 - Comparativo entre tecnologias sem fio

	ZigBee e 802.15.4	GSM/GPRS CDMA	802.11	Bluetooth
Duração média da bateria	anos	1 semana	1 semana	1 semana
Banda	250Kbps	> 2 Mbps	> 54Mbps	720 Kbps
Alcance	Até 100m.	Vários quilômetros.	50 a 100 metros.	10 a 100 metros.*
Vantagens	Baixos custo e consumo.	Infraestrutura existente.	Velocidade e ubiquidade.	Conveniente.

Fonte: Dados do autor

Nota: * teoricamente o Bluetooth alcança 100m, mas ainda não se obtiveram bons resultados a esta distância.

O protocolo ZigBee foi desenvolvido pela *ZigBee Alliance*, que é um grupo de empresas trabalhando em cooperação para o desenvolvimento de um protocolo de rede para ser utilizado em aplicações comerciais e industriais que não necessitassem de altas taxas de transmissão, mas que necessitam de baixa latência e baixa consumo de energia.

O ZigBee utiliza o padrão da norma 802.15.4 como base, com algumas funcionalidades de redes. Foi desenvolvido para redes tipo malha, onde a distância entre dois pontos pode estar fora do alcance do rádio, mas pontos intermediários podem fazer uma ponte, transmitindo assim a informação.

Além da distância entre os rádios que podem interromper a comunicação, este modelo de rede pode ainda estar sujeito a outras barreiras como: lajes, paredes, estruturas metálicas, interferências eletromagnéticas e de RF. Como todos estes problemas são pertinentes a este meio, a solução é buscar um meio que seja inerte a estes problemas para complementar esta solução.

A melhor opção para este caso é a tecnologia PLC que, utilizando a rede elétrica como meio de comunicação, pode perfeitamente estabelecer uma conexão entre pontos que a rede ZigBee tenha dificuldades.

3.4 A Tecnologia PLC

A tecnologia PLC, também conhecida por *powerline*, permite a construção de redes de dados utilizando como meio físico a distribuição de energia elétrica, ou seja, a comunicação de dados é feita através da fiação elétrica já existente em uma residência. Assim, esta tecnologia permite seu uso sem que haja a necessidade de grandes investimentos com quebra de paredes e lançamento de cabos.

A rede elétrica vem sendo estudada para transporte de algo além da energia elétrica desde a década de 30, quando se iniciaram a transmissão de voz, a telemetria e o controle remoto sobre linhas de alta tensão. Na década de 50 iniciaram-se estudos para transmissão de dados via rede elétrica, mas não foi uma tecnologia viável para a época

devido às baixas taxas de comunicação e altos custos. Na década de 80, surgiu um dos primeiros equipamentos comercializados para uso residencial que trafegava voz sobre a rede elétrica e era conhecido como babá eletrônica. Ainda na década de 80, surge a empresa *Pico Electronics*, da Escócia, com a proposta de realizar pequenas automações dentro de uma residência, dando início à automação residencial. Após associações com outras companhias e percalços financeiros, hoje a empresa chama-se X-10 e está sediada nos Estados Unidos da América. Na Figura 17 podemos ter uma idéia dos equipamentos produzidos pela X-10 e na Figura 18, uma visão sobre os circuitos internos de seus módulos.



Figura 17 - Equipamentos da X-10 [12]

Fonte: Wikimedia (2010)

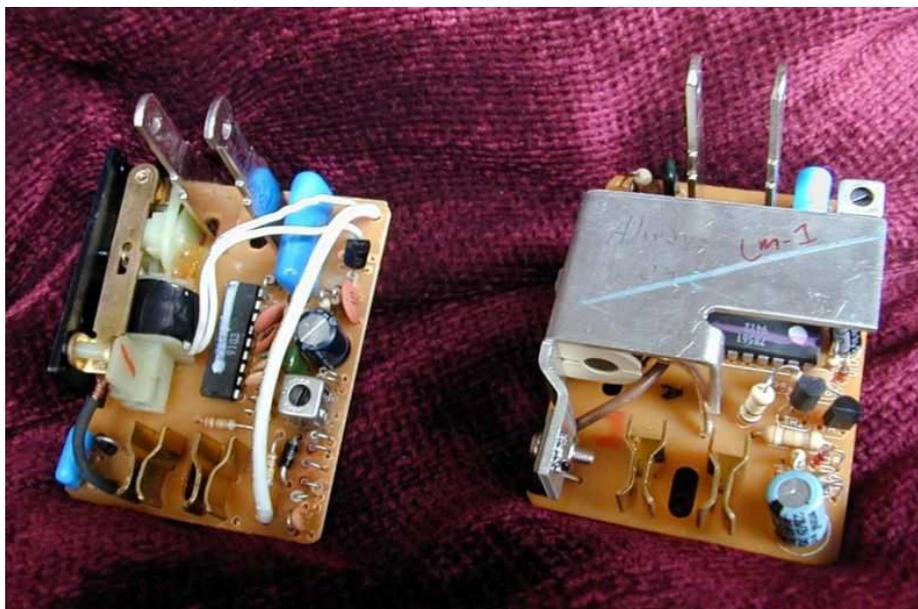


Figura 18 - Circuitos dos módulos X-10

Fonte: Wikimedia (2010)

Com o desenvolvimento da indústria microeletrônica, os custos caíram e o assunto torna a ser foco para várias aplicações como: comunicação, segurança, conforto e entretenimento. Muitos são os estudos e testes atualmente para a difusão da internet pela rede elétrica.

O funcionamento básico desta tecnologia consiste em somar a informação que se deseja transmitir à rede elétrica. Isto só é possível, pois a frequência da rede é da ordem de 60Hz e a informação é modulada com frequências muito mais altas que a da rede, variando de 100KHz até 30MHz, conforme a aplicação. Esta frequência leva o nome de portadora e esta diferença entre as frequências facilita a separação na recepção.

Modulação é um processo de modificação do sinal da portadora pelo sinal da informação que se deseja transmitir. A portadora possui uma frequência mais alta que o sinal da informação e propicia a transmissão no meio a ser utilizado. Quando a informação que se deseja transmitir é digital, a modulação pode ser feita por várias técnicas diferentes e veremos algumas das que se aplicam ao nosso propósito como:

a) *Amplitude Shift Keying* (ASK) é a modulação em amplitude e neste modo a informação altera a amplitude da portadora e sua representação pode ser vista na Figura 19;

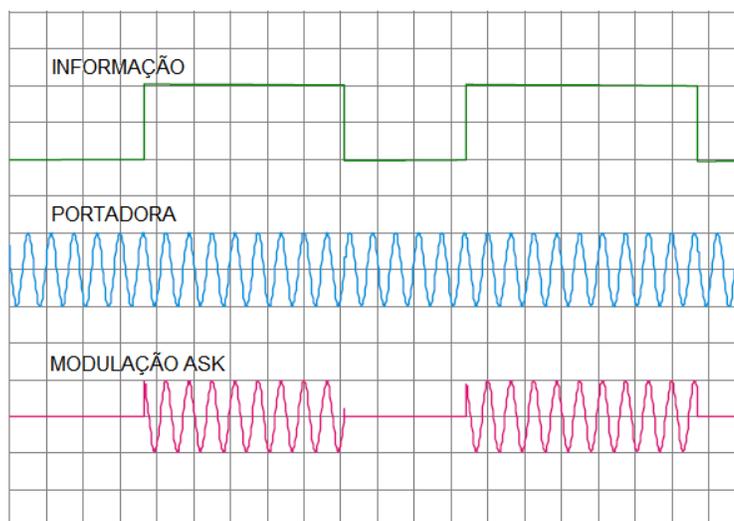


Figura 19 - Modulação ASK

Fonte: Dados do autor

b) *Frequency Shift Keying* (FSK) é a modulação da portadora em frequência, onde o bit 0 corresponde a uma frequência e o bit 1 a uma frequência maior, conforme visto na Figura 20. Uma variação deste método de modulação é o *Binary Frequency Shift Keying* (BFSK), onde é possível representar mais bits, sendo cada bit representado por uma frequência distinta;

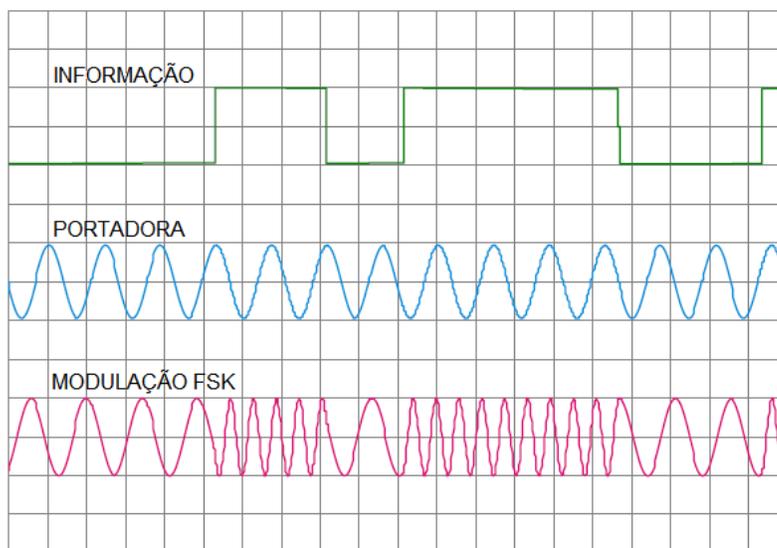


Figura 20 - Modulação FSK

Fonte: Dados do autor

- c) *Phase Shift Keying (PSK)*, ou modulação por chaveamento de fase, é uma técnica de modulação onde ocorre a mudança da fase da portadora cada vez que há uma transição do bit de informação, conforme mostrado na Figura 21.

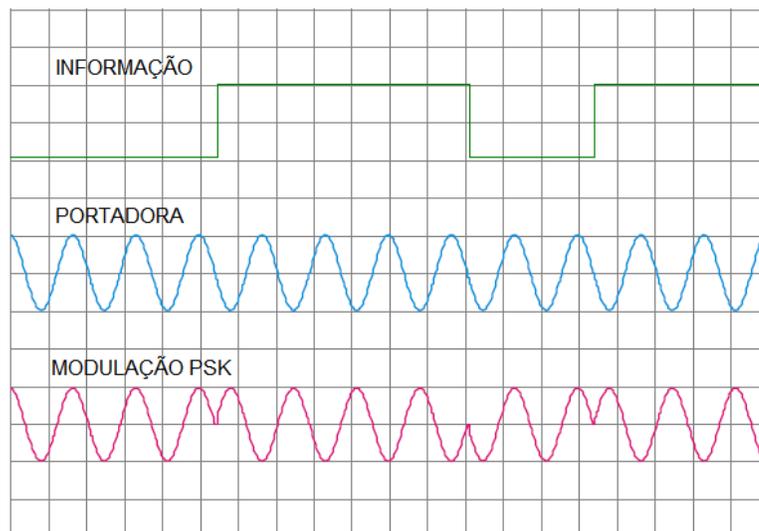


Figura 21 - Modulação PSK

Fonte: Dados do autor

- d) *Spread Spectrum*, ou modulação por espalhamento espectral, é uma técnica de transmissão onde a informação é transmitida em várias frequências de portadoras diferentes, ou seja, ocupa uma largura de banda maior que os outros métodos de modulação. Pode ser do tipo *Frequency Hopping Spread Spectrum* (FHSS), quando a sequência da transmissão se dá aos saltos seguindo uma sequência pseudo-randômica, mas pré-determinada para o transmissor e receptor ou *Direct Sequence Spread Spectrum* (DSSS), quando uma sequência direta é utilizada. Pode haver ainda uma combinação entre as duas anteriores gerando um sistema híbrido. Na Figura 22 podemos ver um exemplo de FHSS, onde existem 7 portadoras com frequências diferentes que são transmitidas cada uma em um instante de tempo.

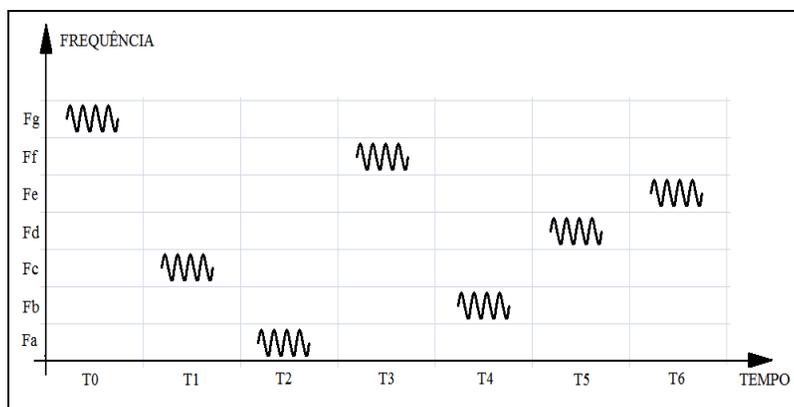


Figura 22 - Modulação FHSS

Fonte: Dados do autor

- e) *On Off Keying* (OOK), é uma técnica de modulação derivada da ASK e é a técnica utilizada pelos dispositivos X-10. A modulação em amplitude é adicionada ao sinal da rede elétrica quando este cruza o 0 V e tem duração aproximada de 1ms. O bit 1 é representado por uma sequência de 1 e 0, ou seja, existência de modulação no cruzamento com o zero seguida de ausência de modulação no próximo cruzamento, conforme visto na Figura 23.

O bit 0 é representado por uma sequência de 0 e 1, inversamente ao bit 1.

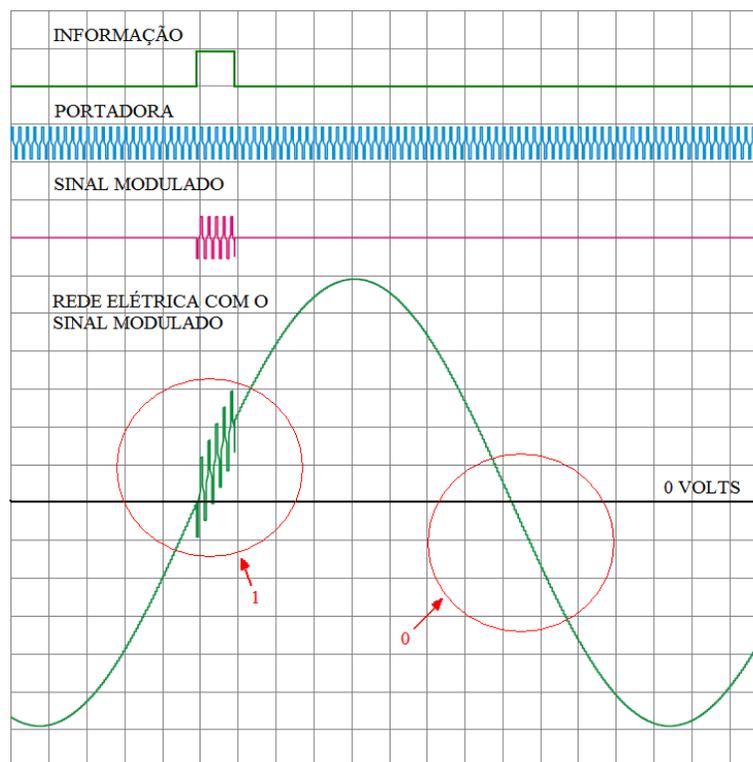


Figura 23 - Modulação OOK

Fonte: Dados do Autor

Uma comparação entre os tipos de modulação para PLC pode ser vista na Tabela 3.

Tabela 3 - Comparação entre técnicas de modulação

	ASK	FSK	PSK	FHSS	OOK
Simplicidade do circuito	simples	Média complexidade	Média complexidade	complexo	simples
Imunidade a ruído	baixa	baixa	boa	Muito boa	baixo
Taxa de comunicação	baixa	baixa	baixa	alta	Muito baixa

Fonte: Dados do autor

4 DESENVOLVIMENTO DO PROJETO

4.1 Introdução

O desenvolvimento deste projeto dividiu-se em *hardware* e *firmware* das diversas partes que o compõe. Para a construção de um modem PLC, vários aspectos foram determinantes como o custo, a simplicidade nas soluções e a facilidade da implantação em uma residência.

Desta forma, neste capítulo será apresentado o desenvolvimento das partes que compõem o projeto, que com a finalidade de facilitar foi dividido em módulos que são:

- a) módulo PLC;
- b) módulo ZigBee;
- c) módulo Tomada;
- d) módulo Luminária;
- e) módulo Chuveiro.

4.2 Módulo PLC

4.2.1 *Hardware*

Embora existam vários métodos de modulação que podem ser utilizados na implementação da tecnologia PLC, temos que analisar a necessidade do projeto quanto a:

- a) simplicidade do circuito;
- b) imunidade a ruído;

- c) taxa de comunicação;
- d) custo, entre outros.

Há algumas opções a se seguir para a realização de um projeto de modem PLC. A primeira idéia foi montar um modem utilizando componentes discretos, mas devido à quantidade de componentes utilizados, seu tamanho e custo para uma futura produção, tornar-se-iam um problema. Por outro lado, os modems prontos comercializados eram de grandes dimensões e custo elevado, e a maioria tinha o foco para utilização em redes ethernet, automação residencial ou não se enquadravam perfeitamente na integração com as demais partes do projeto. Na Figura 24 temos algumas imagens destes modems comerciais.

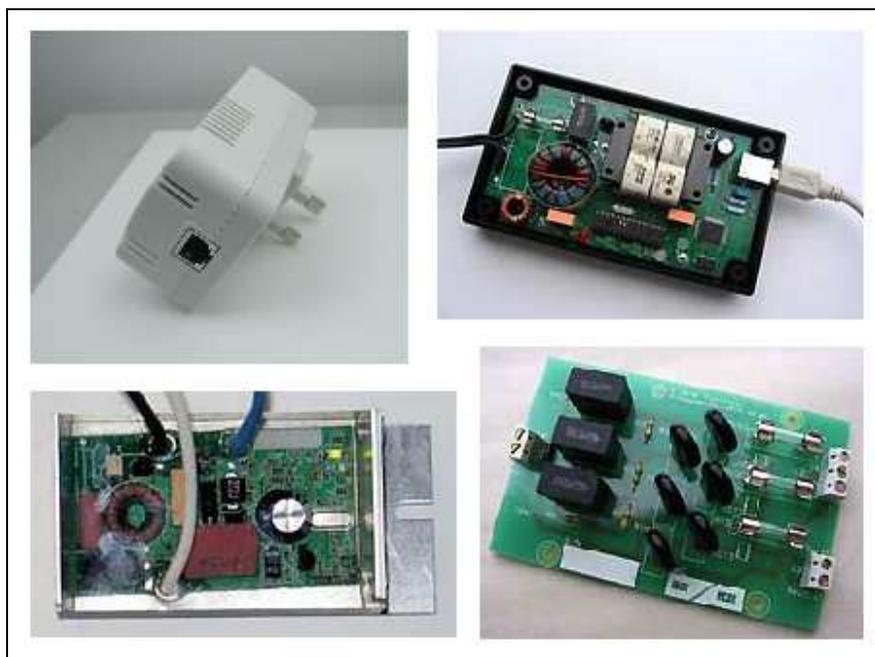


Figura 24 - Exemplos de modems PLC

Fonte: Varilume (2010)

O caminho escolhido foi o de procurar no mercado um circuito integrado (CI) que atendesse todas as necessidades do projeto ou, pelo menos, a maior parte delas. Os fabricantes de CIs pesquisados estão elencados na Tabela 4 e na análise feita foram

considerados a disponibilidade de amostras, o custo do CI e a complexidade do circuito que impactaria diretamente no custo e no tamanho final do projeto.

Tabela 4 - Fabricantes e seus CIs para PLC

FABRICANTE	CIs
Agilent	HCPL-810J
Intellon	INT-5130 e INT-5200
Maxim	MAX-2986
NXP	TDA-5051A
SGS-Thomson	ST-7537HS1
Toshiba	TMPN-3150B1AF

Fonte: Dados do autor

Entre as opções analisadas, o CI TDA-5051A do fabricante NXP [15] foi o escolhido por ter poucos componentes externos e proporcionar um baixo custo para esta aplicação. A taxa de comunicação de 600 bps não foi um problema, pois, apesar de baixa atende a necessidade. A escolha confirmou-se quando o custo pesquisado junto ao representante comercial foi de US\$ 2,10 para a quantidade de 10.000/ano (em julho de 2008). O distribuidor local forneceu amostras para os testes e o diagrama em blocos do circuito do modem está representado na Figura 25, com a indicação dos blocos referentes ao circuito adicional necessário. Na Figura 26 temos um diagrama em blocos do CI escolhido.

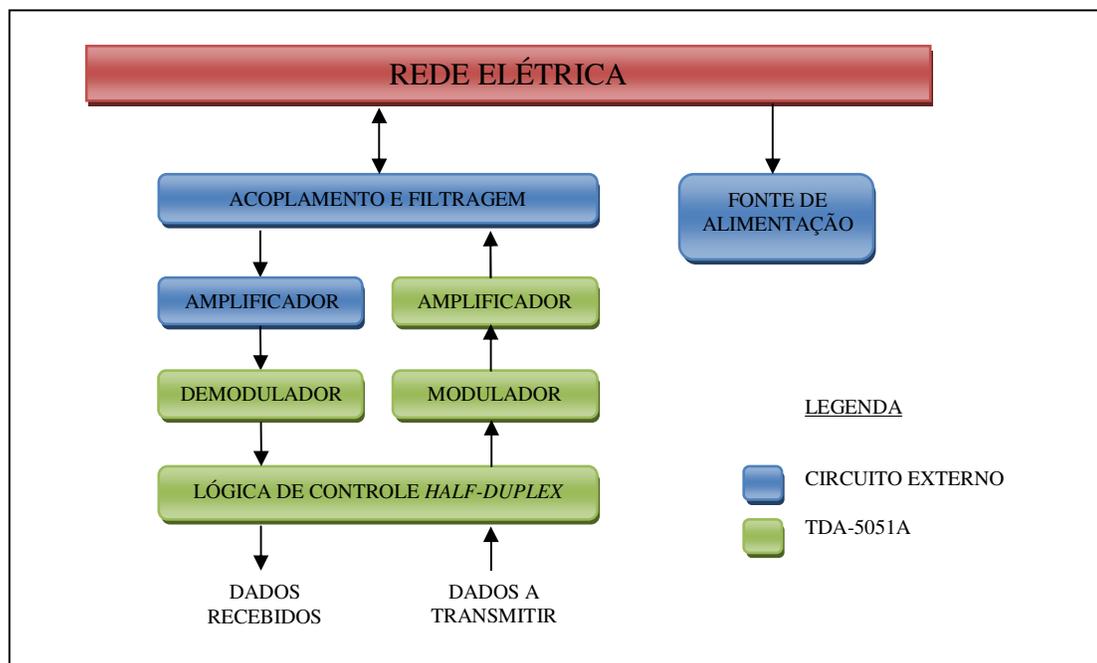


Figura 25 - Diagrama de modem PLC

Fonte: Dados do autor

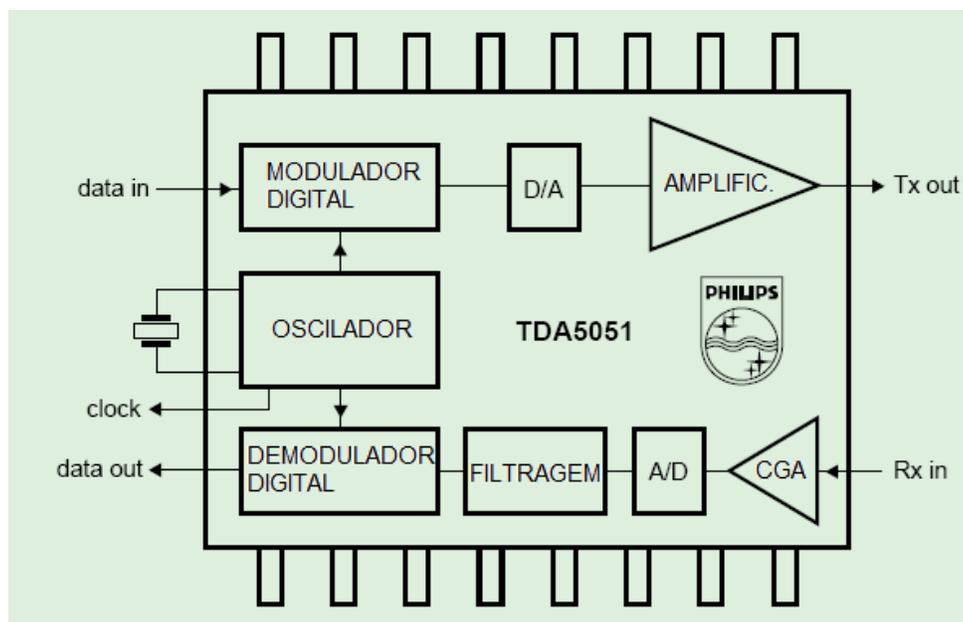


Figura 26 - Diagrama em blocos do TDA-5051A

Fonte: NXP (2010)

O *datasheet* do fabricante apresenta vários circuitos aplicativos com características diferentes quanto à fonte de alimentação, acoplamento e ganho do amplificador de saída. Como a melhor opção não apresentava acréscimo significativo de tamanho e custo, utilizou-se o circuito sugerido que utilizava fonte com transformador, amplificador de saída com transistor e acoplamento dos sinais com a rede elétrica com transformador. O circuito utilizado é visto na Figura 27.

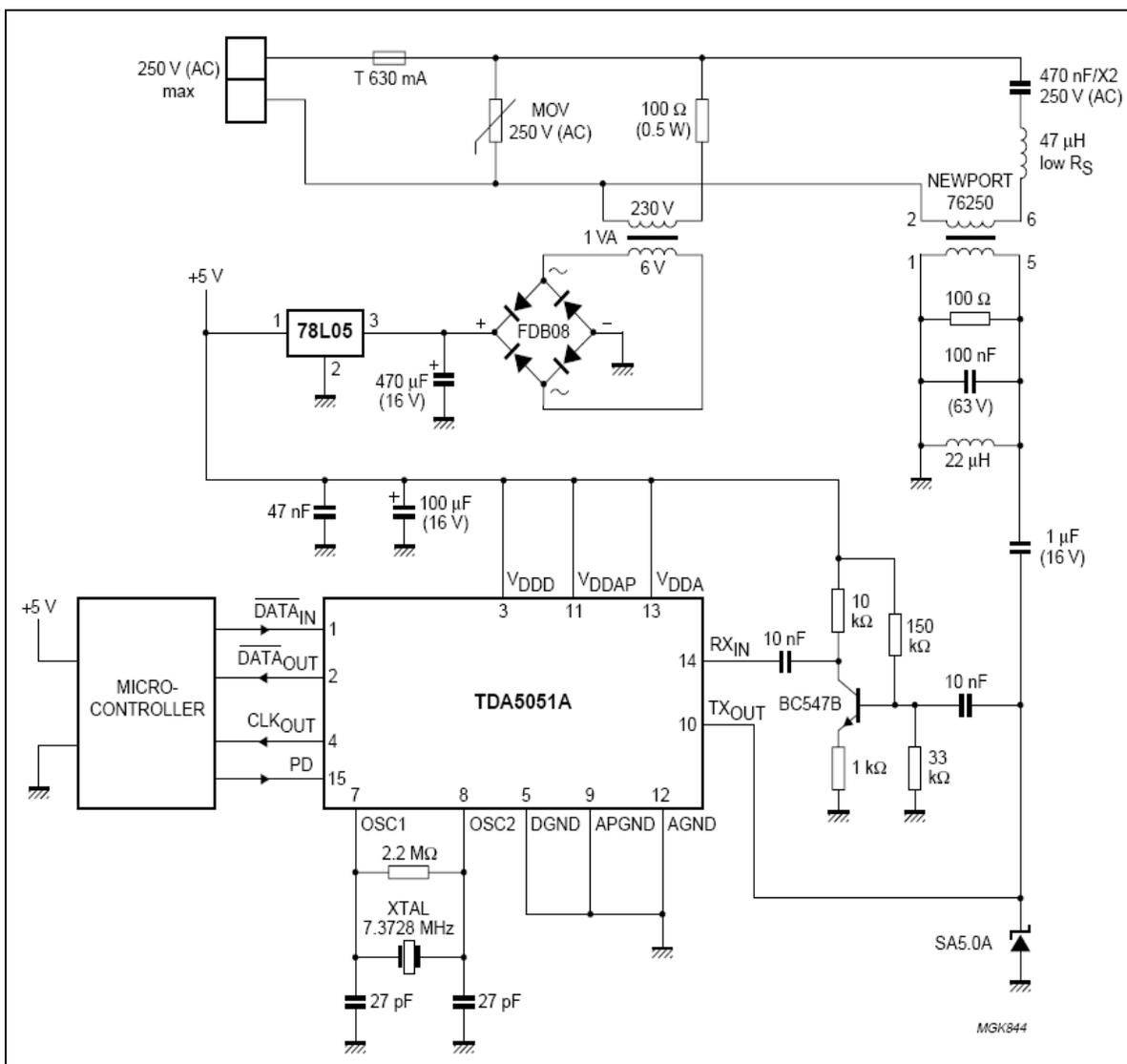


Figura 27 – Diagrama Esquemático Sugerido pelo fabricante

Fonte: NXP (2010)

Antes da utilização do circuito sugerido pelo fabricante, foi realizada uma simulação para verificar o funcionamento do circuito de acoplamento e filtragem, utilizando o simulador PSIM da empresa Powersim Inc.. Para esta simulação, foi necessário gerar o sinal de uma comunicação PLC com blocos lógicos, conforme é mostrado na Figura 28, juntamente com o restante do circuito de acoplamento e filtragem.

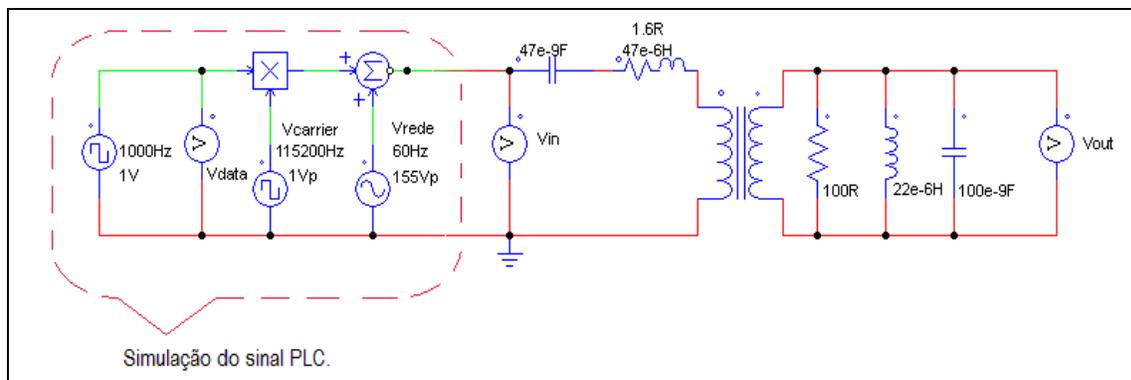


Figura 28 - Circuito de acoplamento e filtragem.

Fonte: Dados do autor

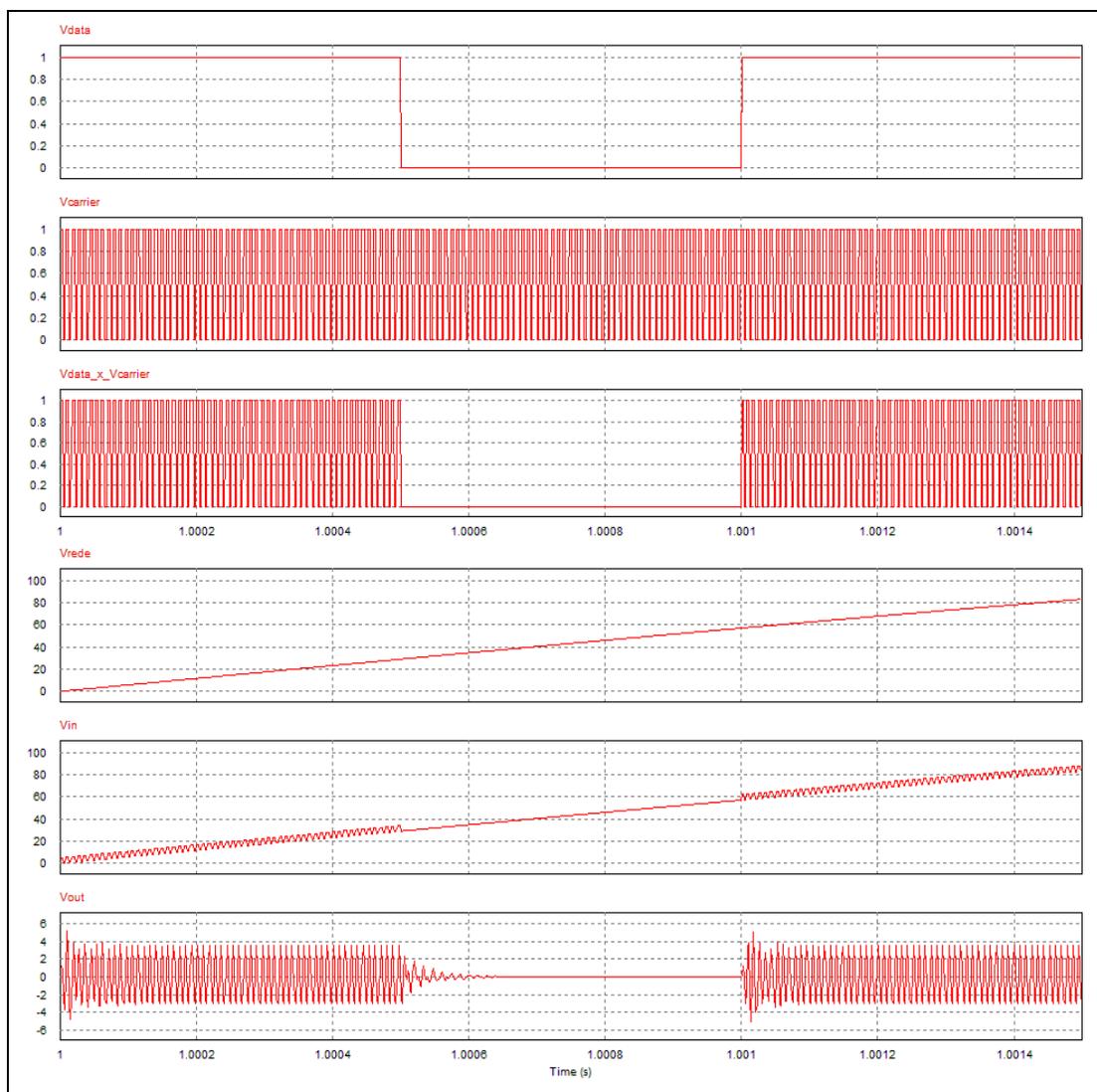


Figura 29 - Ondas da simulação do circuito de entrada

Fonte: Dados do autor

Para a simulação do sinal PLC, foi utilizado uma onda quadrada de 1KHz como informação (V_{data}) e como portadora uma onda quadrada de 115,2KHz ($V_{carrier}$). Ambos somados a tensão de rede elétrica de 110Vef com 60Hz de frequência (V_{rede}). O sinal gerado (V_{in}) foi aplicado ao circuito e após passar pelos filtros e transformador de acoplamento, resultou V_{out} . O resultado obtido foi satisfatório e as ondas podem ser vistas na Figura 29. O sinal resultante deste circuito, precisa ainda passar por um

detector de envoltória, operação esta que será realizada internamente no CI TDA5051A.

O CI só é fornecido no encapsulamento surface mount device (SMD), o que impossibilita a montagem em matriz de contatos tipo *prot-o-board*. Para realizar os testes preliminares, foi necessário a confecção de protótipos em placas de circuitos impressos e, como a intenção inicial era de utilizá-lo em vários módulos, a placa foi projetada em formato de pente para atender esta finalidade como pode ser visto na Figura 30. Seu esquema sofreu alguns ajustes em relação ao sugerido pelo fabricante e está representado na Figura 31 e seu *lay-out* na Figura 32.

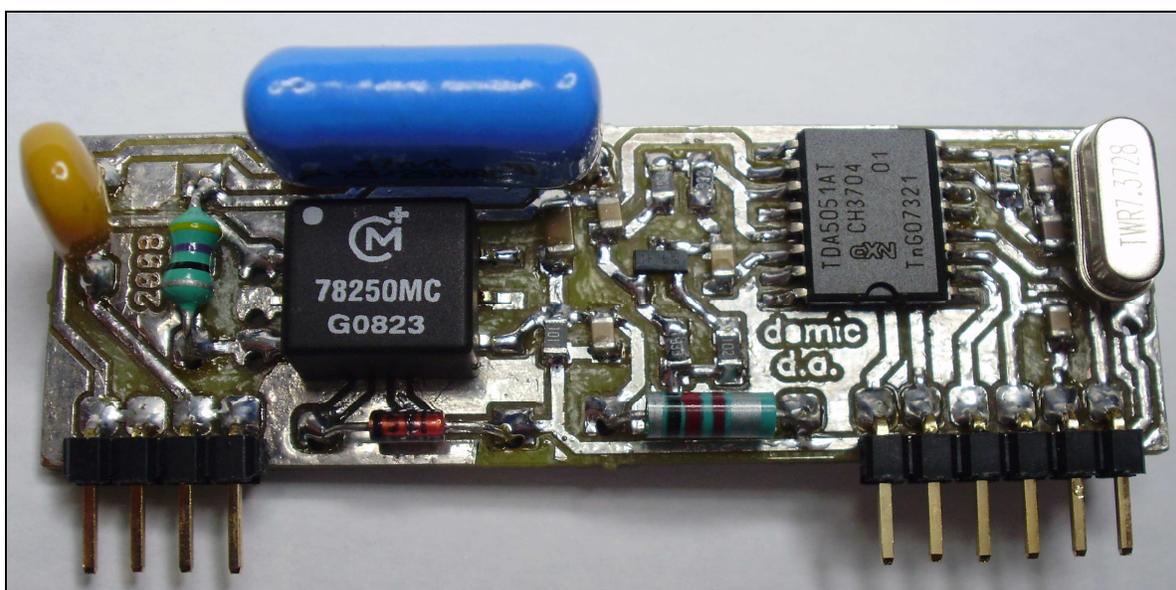


Figura 30 - Modem PLC

Fonte: Dados do autor

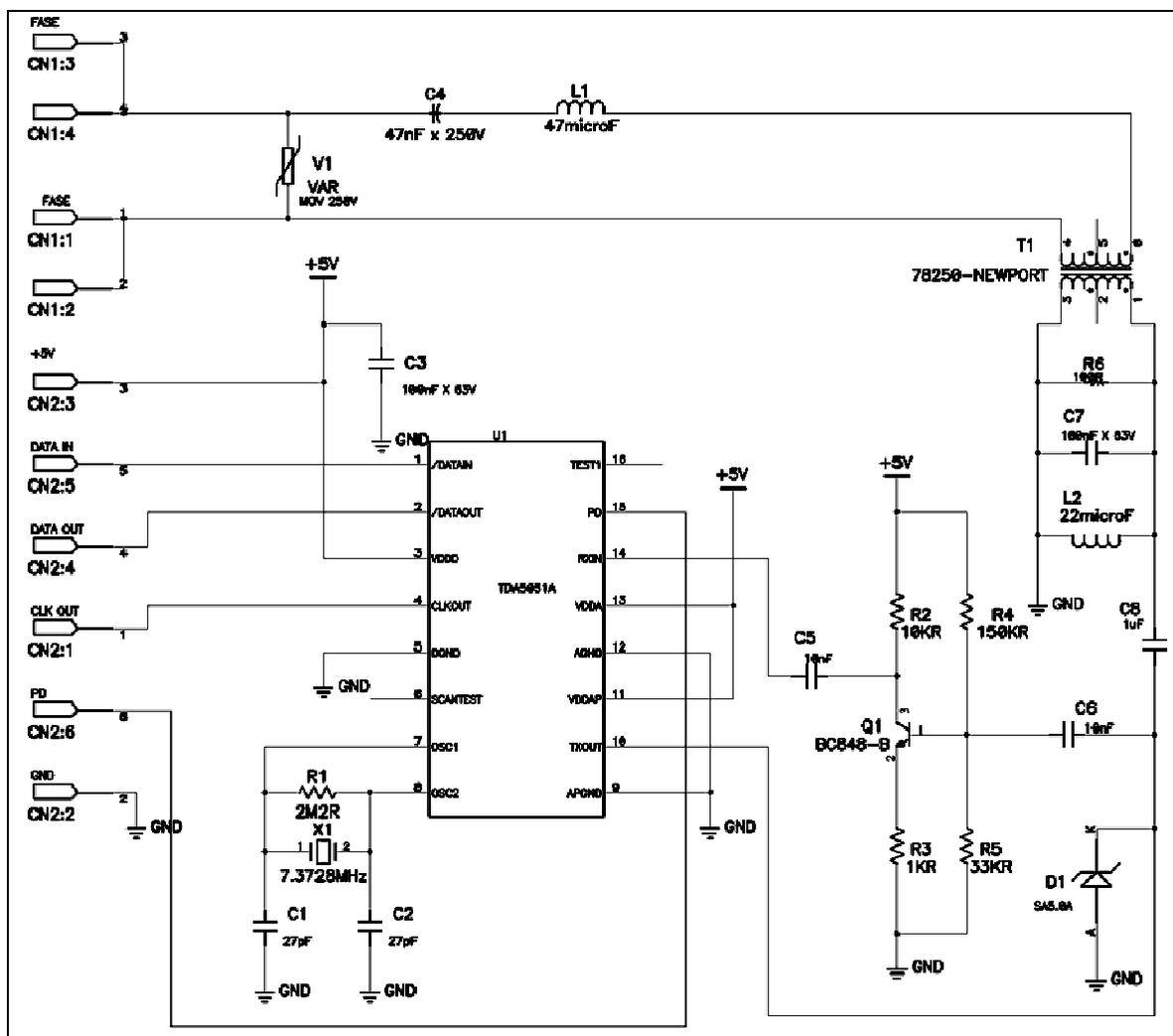


Figura 31 – Diagrama Esquemático do modem PLC

Fonte: Dados do autor

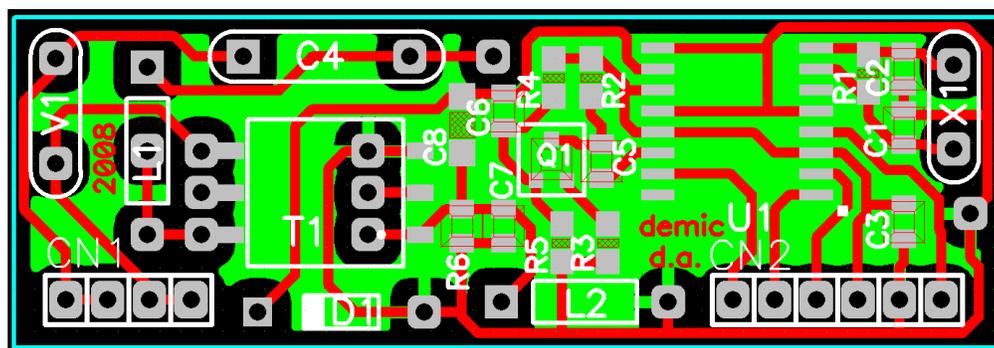


Figura 32 – Layout do modem PLC

Fonte: Dados do autor

4.2.2 Firmware

O TDA5051A realizará a função de modem PLC, porém, é necessário o gerenciamento desta comunicação e para esta função, foi utilizado o microcontrolador ATMEGA1284P da ATMEL [16].

A escolha deste componente foi feita pela sua disponibilidade no Kit RZRAVEN [17] utilizado por outros módulos do projeto *Breakdown* que necessitavam de comunicação *Universal Serial Bus* (USB) e ZigBee.

Para realizar esta comunicação, foi considerado que a interconexão é do tipo *half-duplex* e que a rede elétrica de uma residência está sujeita a ruídos e interferências elétricas geradas por equipamentos e eletrodomésticos. Estas interferências podem se somar ou subtrair aos dados transmitidos, o que pode atrapalhar a comunicação com possíveis distorções das informações transmitidas.

O programa principal controla a comunicação entre os módulos Zigbee com a intenção de reenviar as informações para a central de armazenamento. Em trechos com barreiras que impossibilitam a comunicação via RF, a mesma se dará pela rede elétrica através do modem PLC. Para o controle desta comunicação foi criado um protocolo que garante uma comunicação segura e eficiente. Este protocolo foi desenvolvido para funcionar como uma sub-rotina do programa principal sem que isso atrapalhe suas funções, e para isso utilizará um recurso do *hardware* do microcontrolador ATMEGA1284P que é a *Universal Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter* (USART). A USART foi configurada para um *start bit*, palavra de oito *bits* e dois *stop bits* e o formato dos *frames* do protocolo criado podem ser visto na Figura 33.

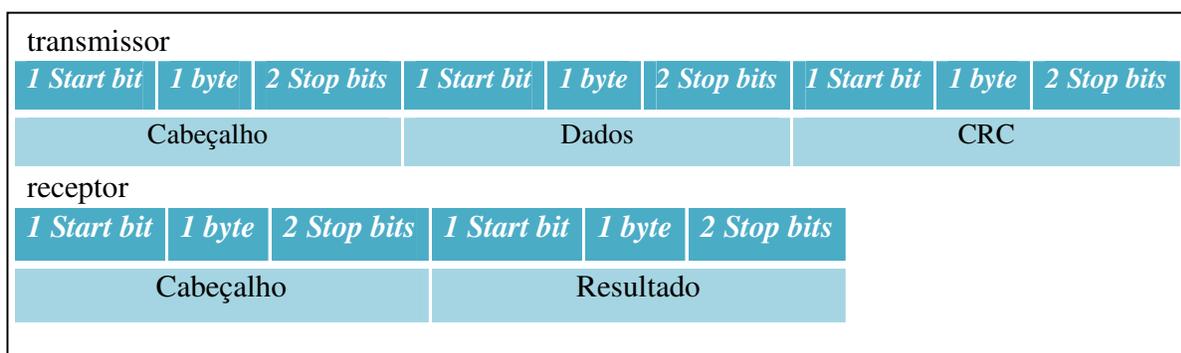


Figura 33 – *Frames* do protocolo

Fonte: Dados do autor

O *firmware* do transmissor escrito para realização da comunicação foi desenvolvido para funcionar inteiramente dentro das interrupções do *TIMER*, *USART-TX* e *USART-RX*. No programa principal, foram adicionadas apenas as declarações de variáveis, configurações da *USART* e das interrupções e seu fluxograma pode ser visto na Figura 34.

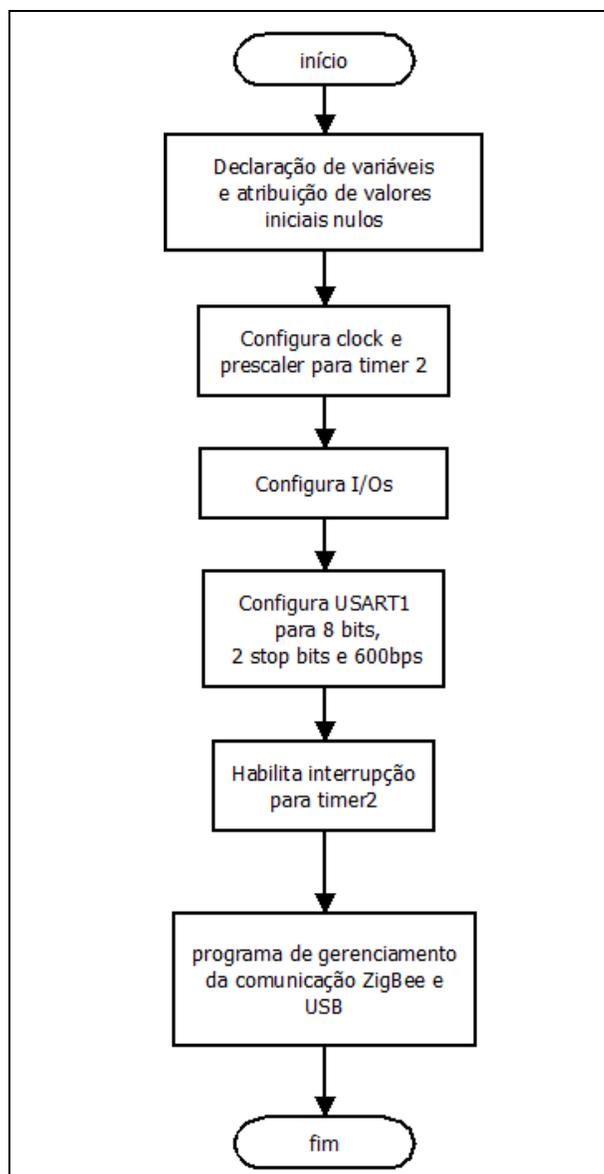


Figura 34 - Fluxograma do programa principal do transmissor

Fonte: .Dados do autor

O fluxograma referente á interrupção do TIMER2 é mostrado na Figura 35 e sua primeira função é um detectar linha desocupada para evitar que haja colisão de dados com outra comunicação iniciada.

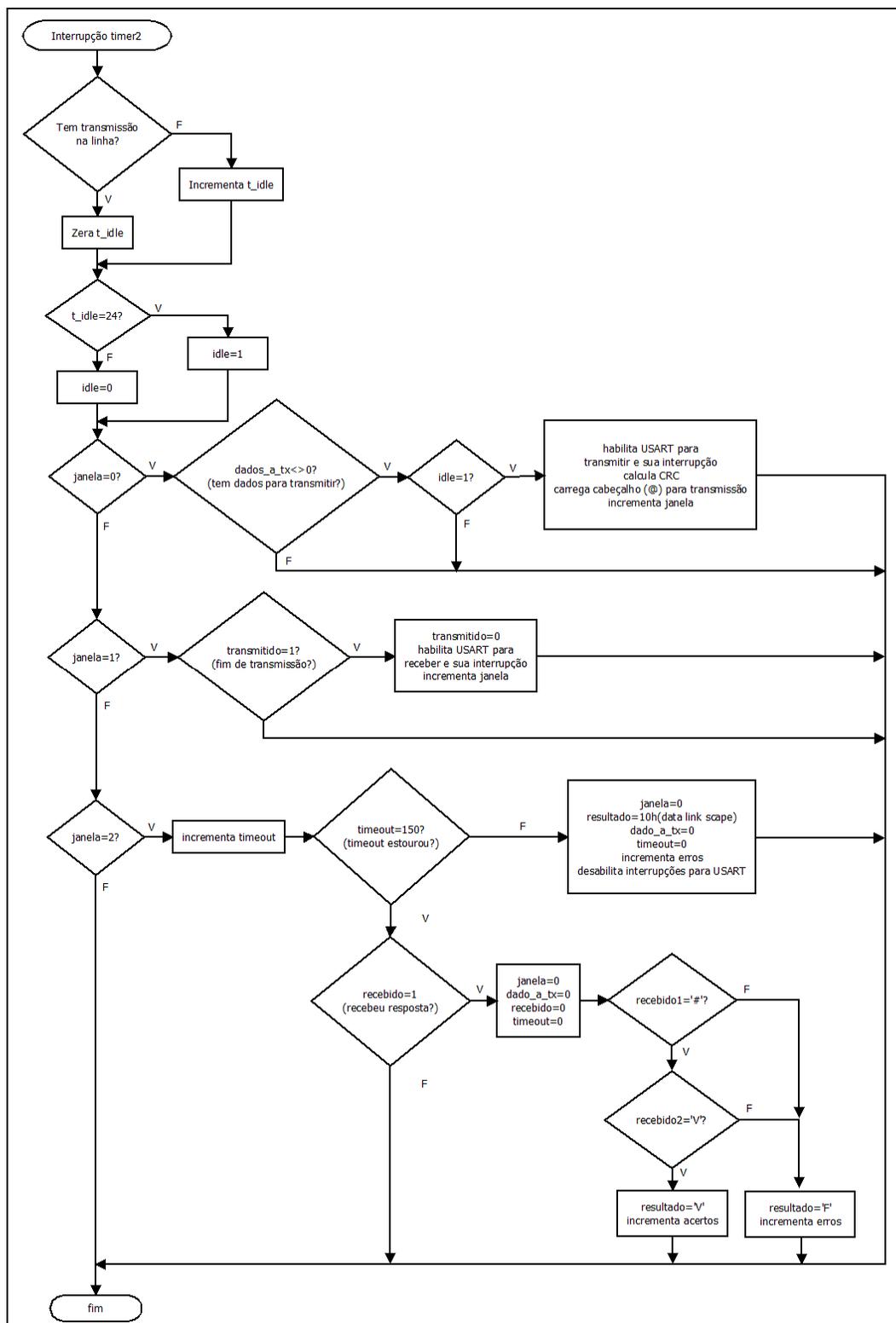


Figura 35 - Fluxograma da Interrupção TIMER2 do transmissor

Fonte: Dados do autor

Uma vez detectado que a linha está desocupada e havendo dados a transmitir, é habilitada a transmissão pela USART, sua interrupção e carregado o cabeçalho no registrador específico para envio, o que dá início a transmissão. Em seguida, para que o receptor possa conferir a integridade do dado enviado, foi utilizado um método similar ao *Cyclic Redundancy Check* (CRC) que utilizou o polinômio de 4ª ordem $x^4 + x^1 + x^0$. O código CRC é gerado e anexado ao dado enviado ao receptor, que por sua vez, faz a mesma operação para conferir se o CRC pertence ao dado recebido. Ainda dentro da interrupção referida, conforme apresentado na Figura 36, serão enviados os dados e em seguida o CRC calculado.

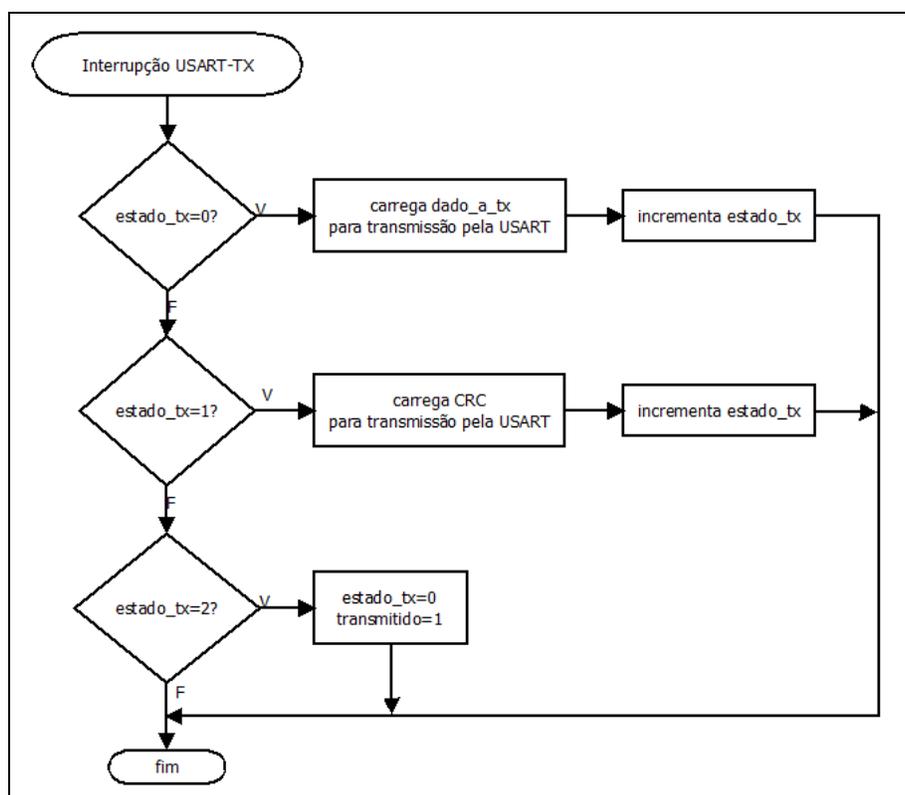


Figura 36 - Fluxograma da Interrupção USART-TX do transmissor

Fonte: Dados do autor

Depois de enviado o frame completo, o transmissor aguarda a recepção do frame de resposta do receptor, que começa com um cabeçalho e em seguida com o resultado 'V'

ou 'F', conforme podemos observar na Figura 37. O *firmware* do transmissor foi escrito em linguagem C no ambiente de desenvolvimento da ATMEL AVR Studio4 e é apresentado no Apêndice A.

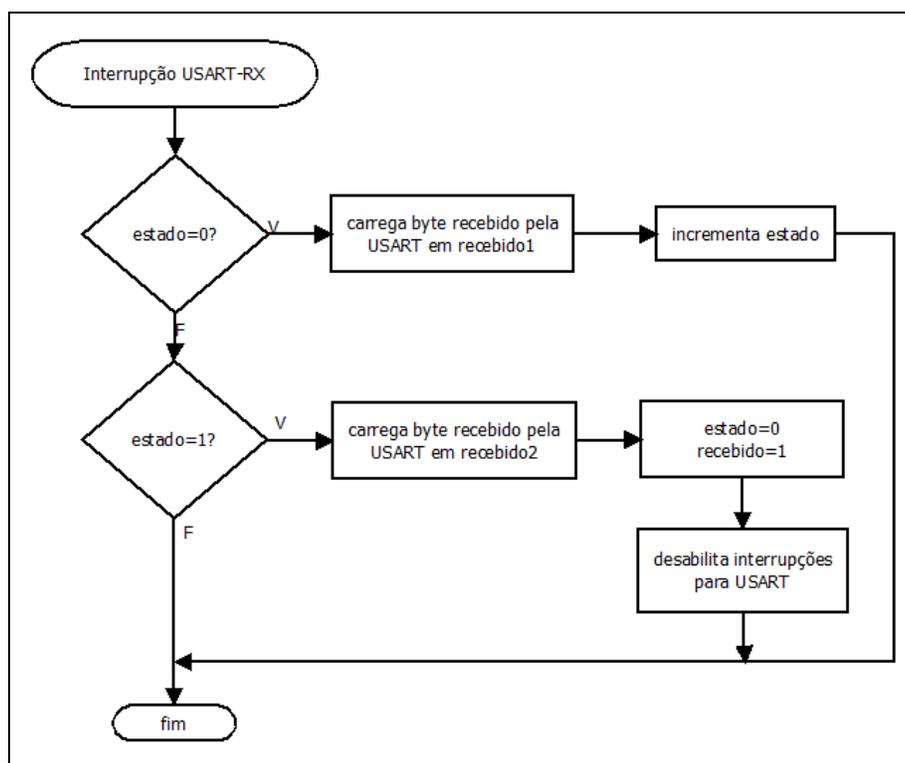


Figura 37 - Fluxograma da Interrupção USART-RX do transmissor

Fonte: .Dados do autor

O *firmware* do receptor também foi desenvolvido para ser executado sem atrapalhar as demais funções do módulo, e, portanto será executado dentro das interrupções da USART-TX, USART-RX e TIMER, ficando no programa principal apenas as declarações de variáveis e configurações da USART e do *TIMER*.

A primeira função deste *firmware* é receber o cabeçalho correto e só então aceitar os dois bytes seguintes que são o dado e o CRC. Ao receber o dado, é feito o cálculo do CRC para em seguida compará-lo com o CRC recebido, o que gera um resultado verdadeiro ou falso. De posse do resultado, após verificar que a linha está desocupada,

é enviado um cabeçalho de resposta seguido da resposta 'V' ou 'F' para que o transmissor possa enviar o próximo dado ou refazer o último envio. Os fluxogramas das funções aqui descritas podem ser vistos nas Figuras 38, 39, 40 e 41.

O *firmware* do receptor foi escrito em linguagem C no ambiente de desenvolvimento da ATMEL AVR Studio4 e é apresentado no Apêndice B.

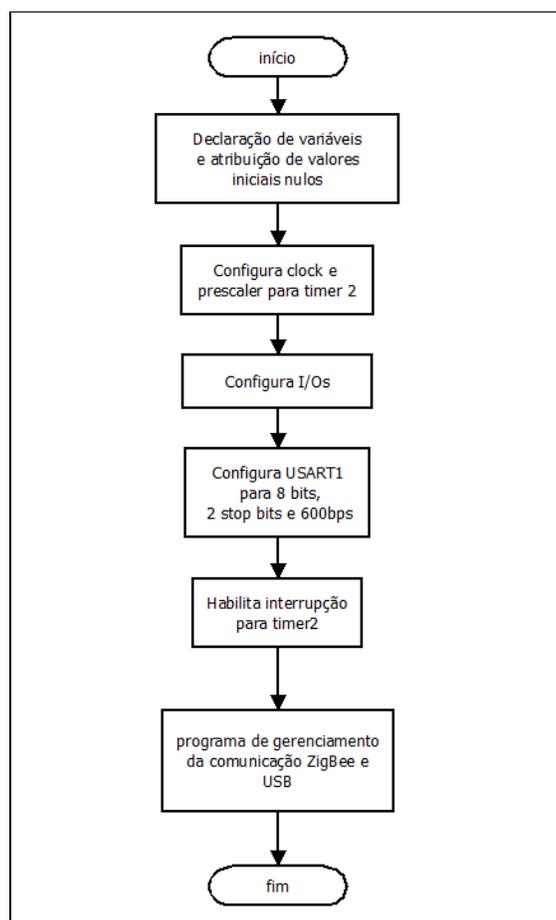


Figura 38 - Fluxograma do programa principal do receptor

Fonte: Dados do autor

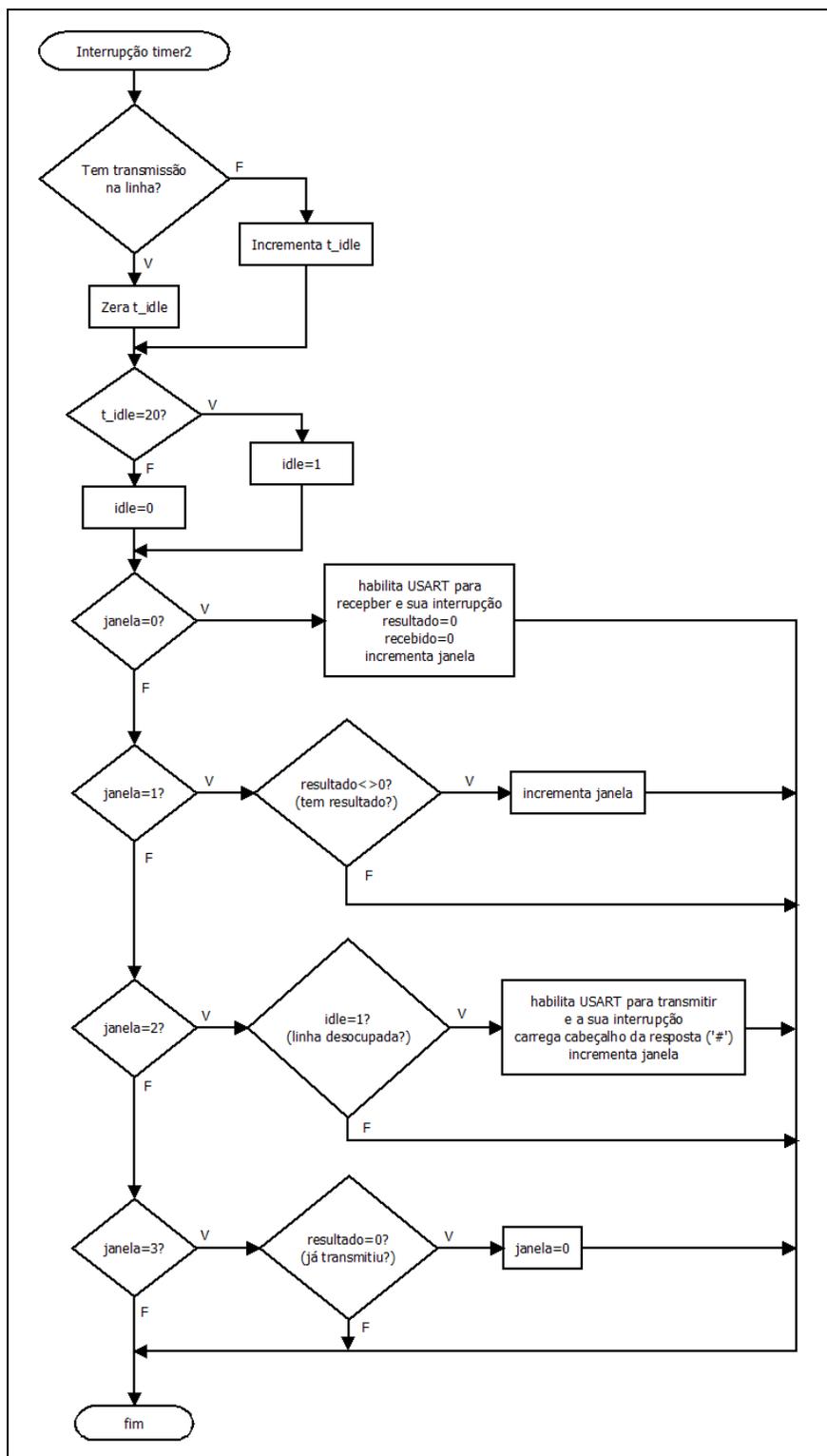


Figura 39 - Fluxograma da Interrupção TIMER2 do receptor

Fonte: Dados do autor

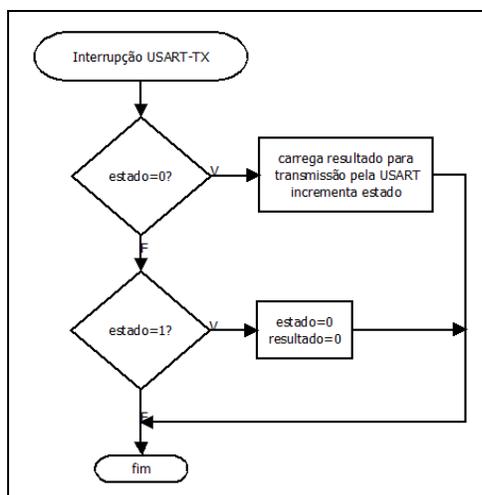


Figura 40 - Fluxograma da Interrupção USART-TX do receptor

Fonte: Dados do autor

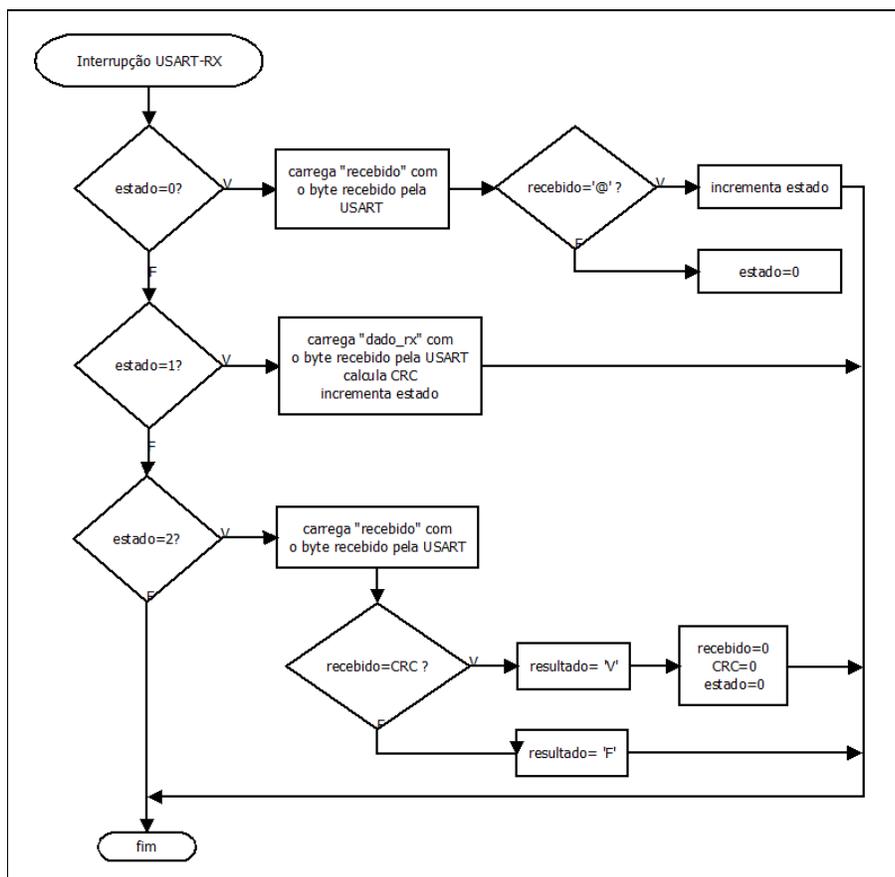


Figura 41 - Fluxograma da Interrupção USART-RX do receptor

Fonte: Dados do autor

5 PROJETO “*BREAKDOWN*” – VISÃO GERAL

O projeto *Breakdown* do consumo de energia elétrica recebeu contribuições de outros profissionais e estudantes e este capítulo pretende registrar uma visão geral do projeto, já que vários módulos o compõe.

5.1 Módulo ZigBee

O kit da ATMEL RZRAVEN foi escolhido pela flexibilidade e custo e é composto por dois módulos AVRRAVEN e um módulo RZUSBSTICK. O módulo AVRRAVEN possui entre suas características importantes para este projeto: o transceptor de rádio com antena de alto ganho na placa, o microcontrolador com duas USARTs e a alimentação por bateria inclusa na placa. O módulo RZUSBSTICK possui um microcontrolador com interface USB e um transceptor de rádio. O diagrama em blocos da placa AVRRAVEN pode ser visto na Figura 42 e podemos verificar que uma das USARTs é responsável pela comunicação entre o microcontrolador 2 e o transceptor e rádio e a outra USART, possui acesso externo e é utilizada para comunicação entre o modem PLC e o microcontrolador 2. O microcontrolador 1 não foi utilizado para este projeto, já que suas funcionalidades não foram necessárias. Suas imagens são mostradas nas figuras 43 e 44.

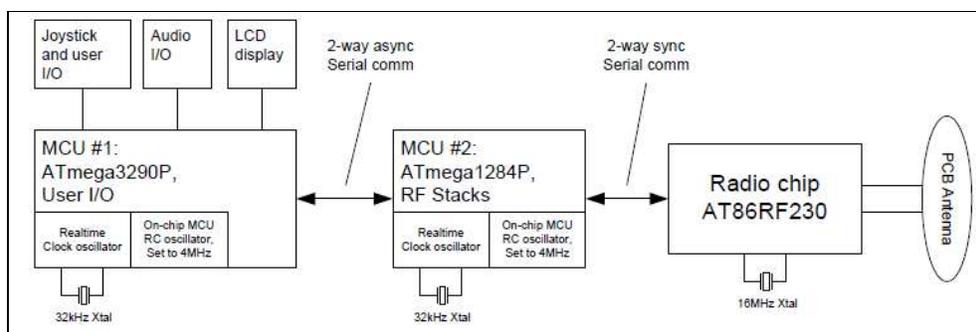


Figura 42 - Diagrama em blocos AVRRAVEN

Fonte: ATMEL, (2010)

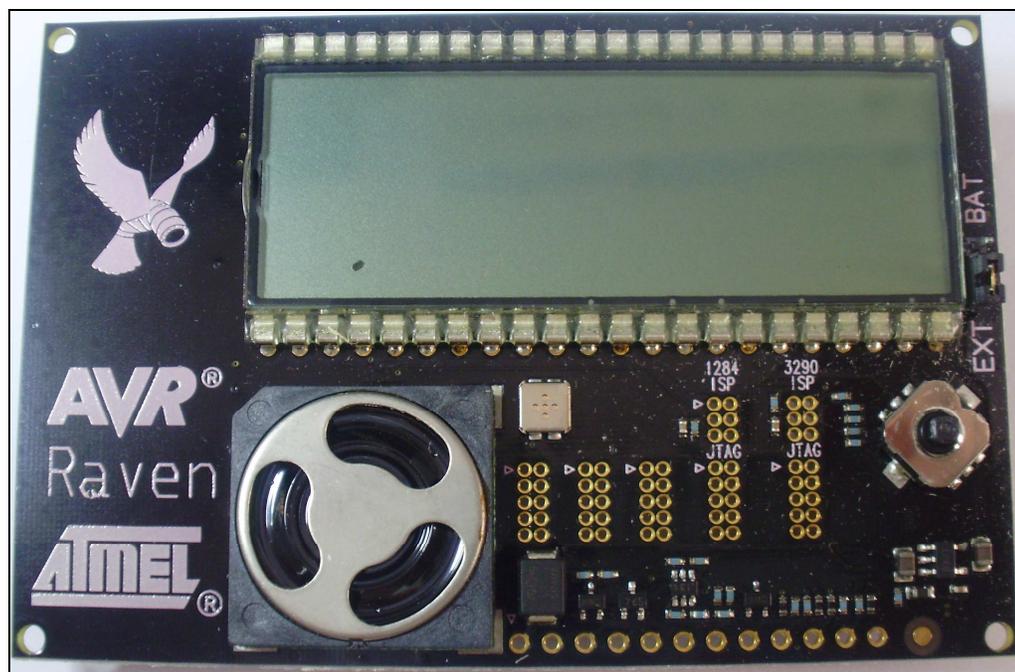


Figura 43 - Módulo AVRRAVEN – frente

Fonte: ATMEL (2010)

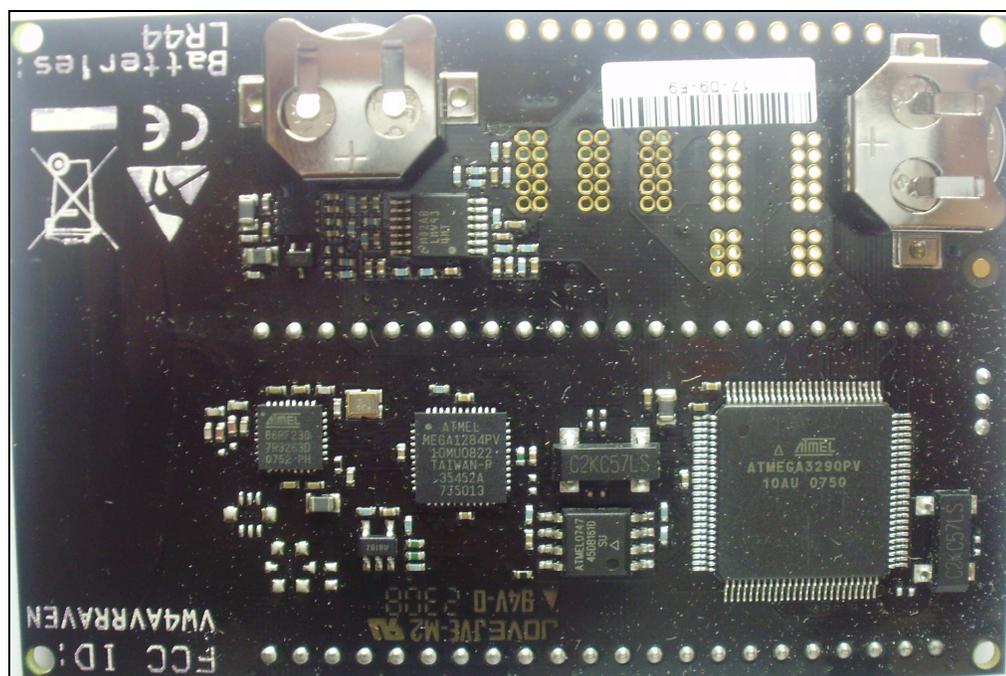


Figura 44 - Módulo AVRRAVEN – traseira

Fonte: ATMEL (2010)

O módulo RZUSBSTICK possui microcontrolador e um transceptor de rádio com antena incorporada na placa de circuito impresso. Este módulo permitiu a realização da função de interface entre concentrador e a rede ZigBee, concentrando todas as informações dos medidores em um computador. O diagrama em blocos da placa pode ser visto na Figura 45 e sua imagem na Figura 46.

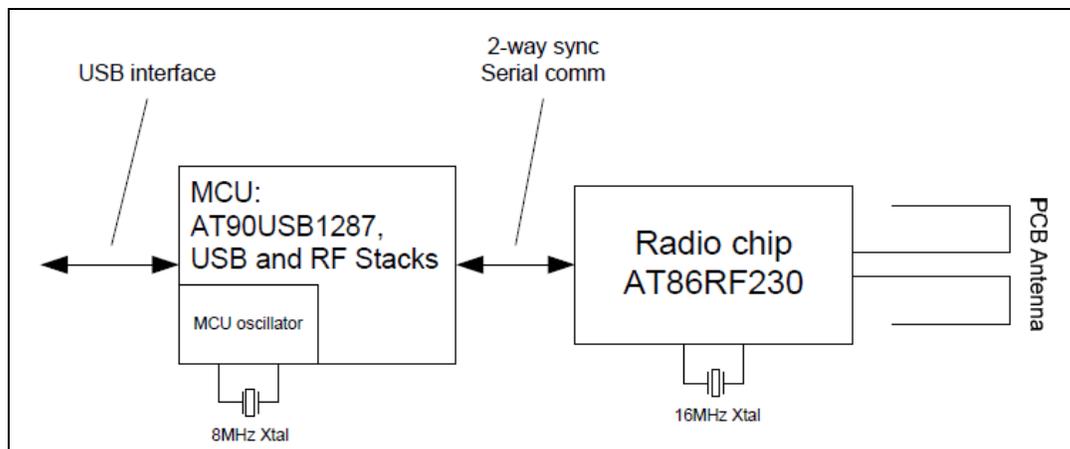


Figura 45 - Diagrama em blocos do RZUSBSTICK

Fonte: ATMEL (2010)

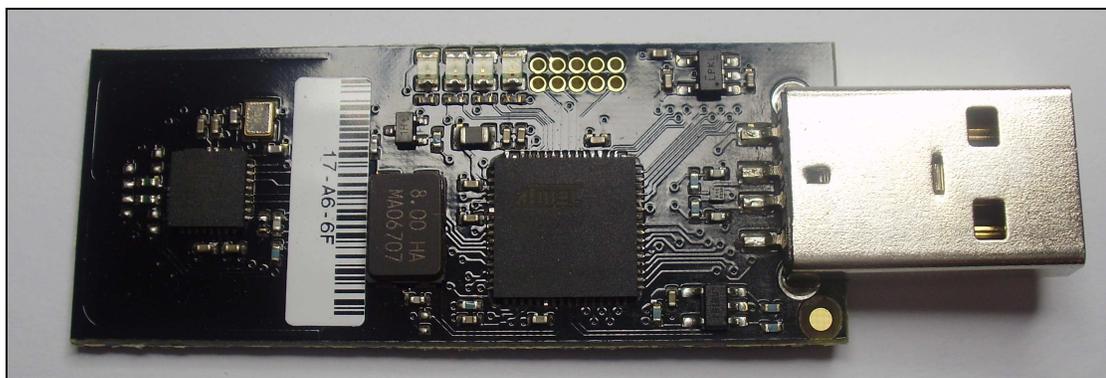


Figura 46 – Módulo RZUSBSTICK

Fonte: ATMEL (2010)

5.2 Módulo PLC

Após os testes do módulo PLC e a confirmação de seu funcionamento, sua placa foi remodelada para ficar no mesmo formato das demais do projeto. Este novo formato foi idealizado para facilitar a conexão com a placa AVRRAVEN do kit ATMEL, onde as placas ficam sobrepostas e as conexões são feitas através de terminais soldados. Seu protótipo pode ser visto na Figura 47 e seu esquema que sofreu alterações na fonte de alimentação e nas conexões na Figura 48.

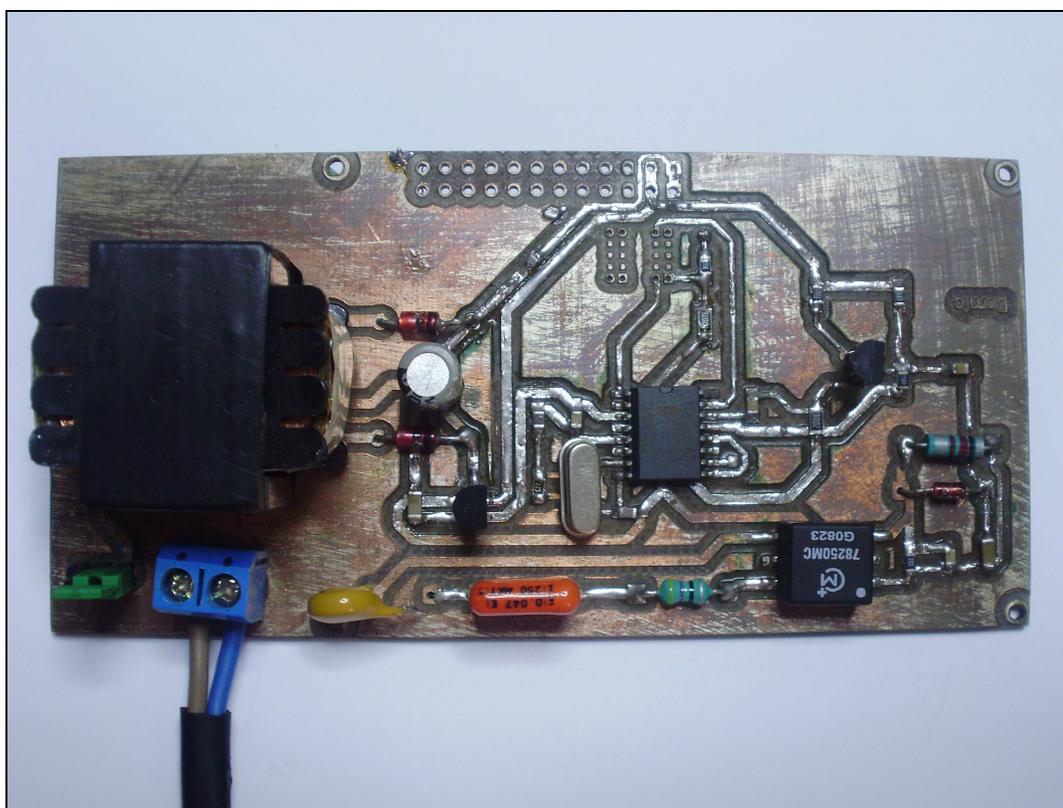


Figura 47 - Módulo PLC – 2º protótipo

Fonte: Dados do autor

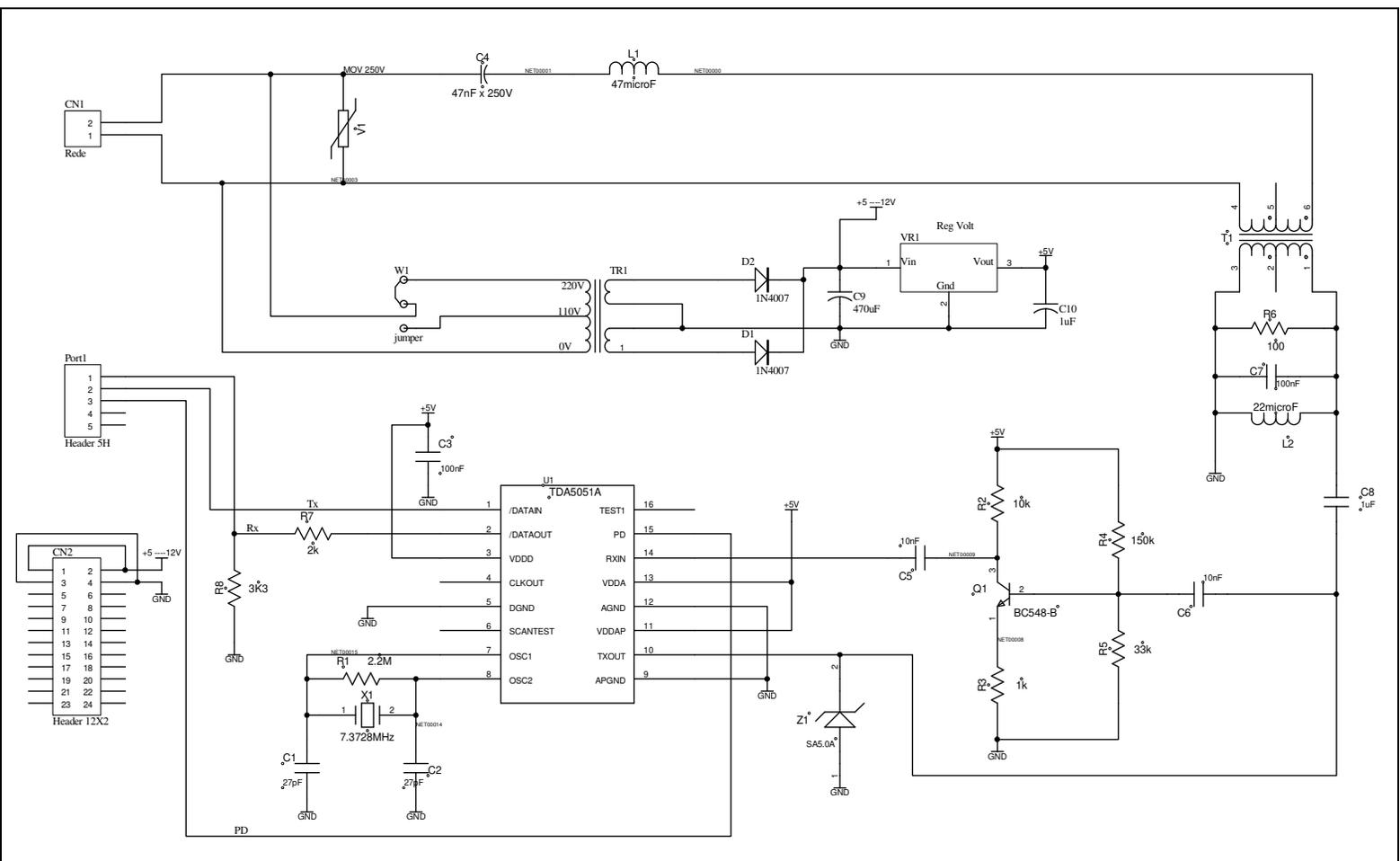


Figura 48 - Diagrama esquemático do modem PLC – 2º protótipo

Fonte: Dados do autor

5.3 Módulo Tomada

Este módulo foi desenvolvido para os equipamentos consumidores residenciais que utilizam conexão por tomada. Nas Figuras 49 e 50 podemos ver suas imagens e na Figura 51 seu diagrama esquemático.

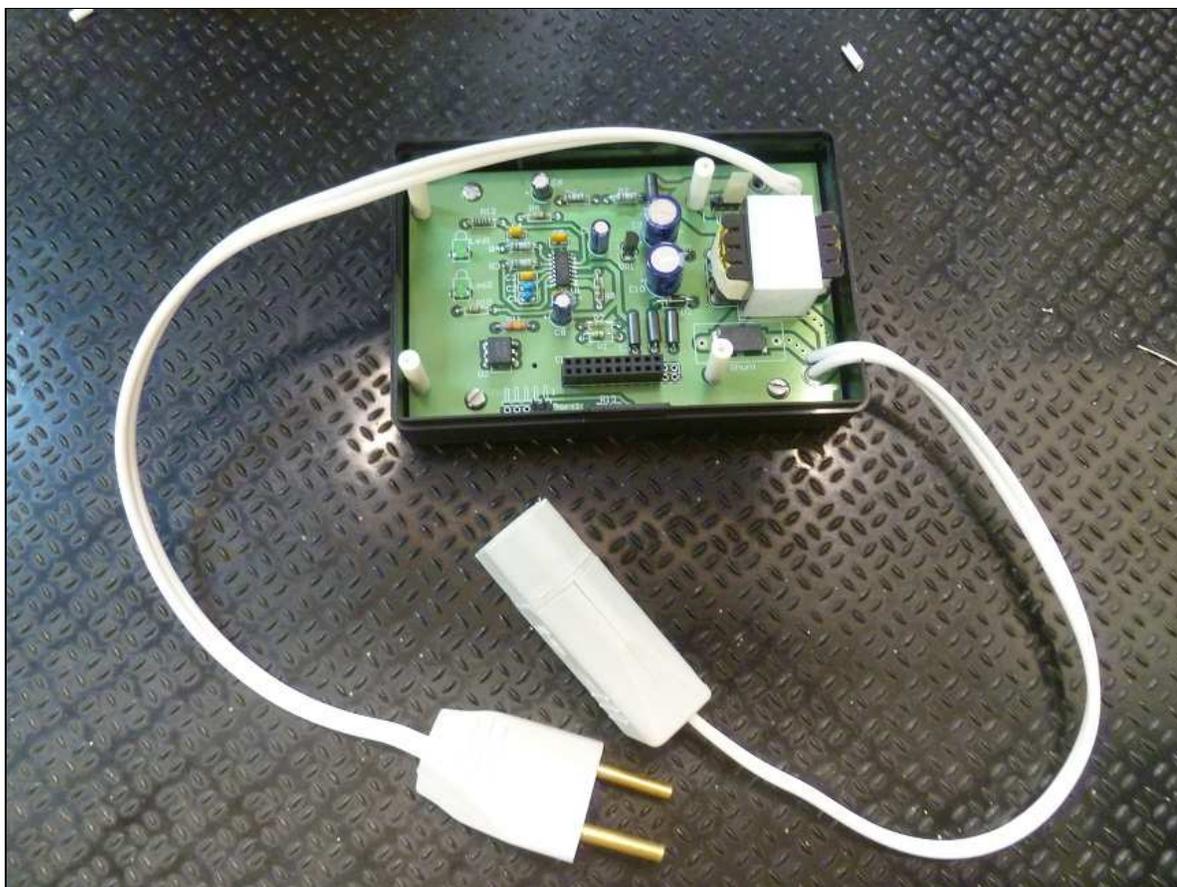


Figura 49 - Módulo tomada sem o kit AVRRAVEN

Fonte: Dados do Autor

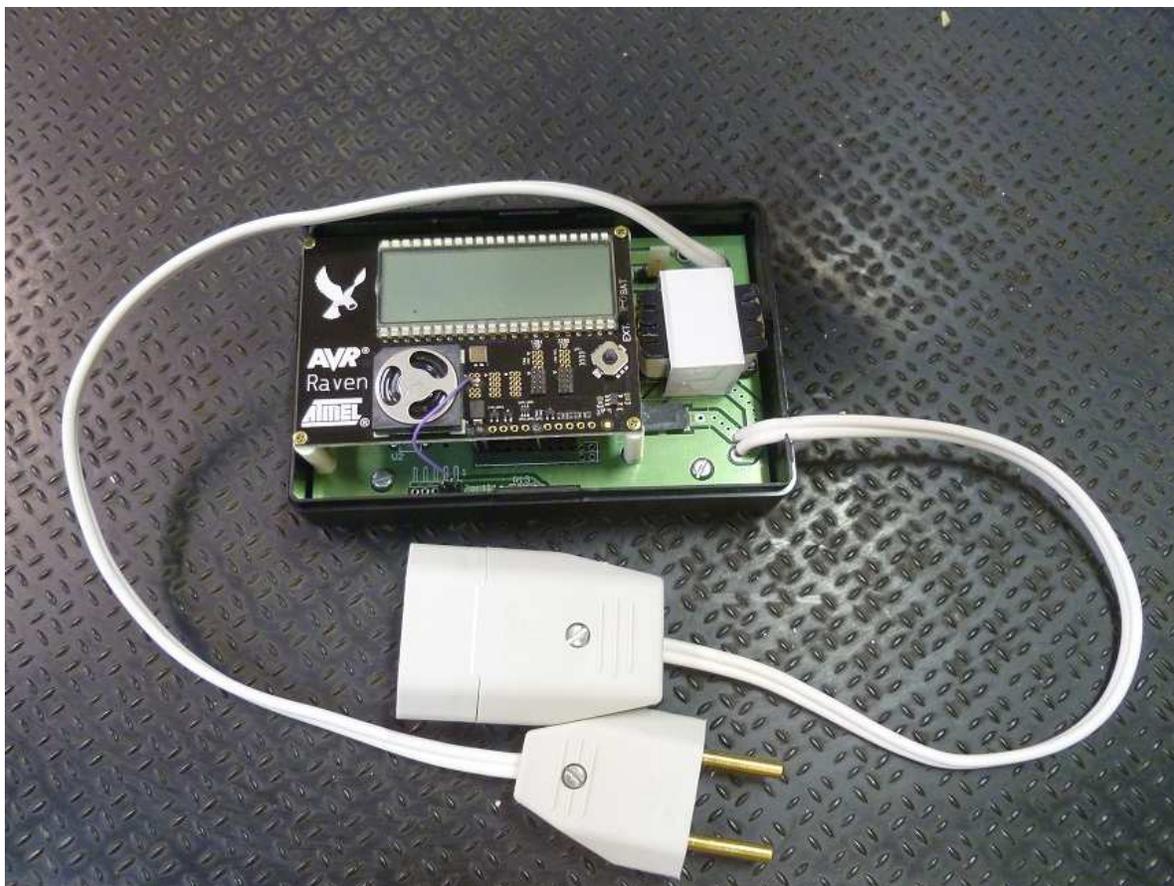


Figura 50 - Módulo tomada com o kit AVRRIVEN

Fonte: Dados do autor

A medição do consumo de energia foi realizada através de um resistor *shunt* e foi utilizado o CI AD71056 para a totalização do consumo. O resultado obtido é informado através de pulsos onde a frequência é diretamente proporcional ao consumo. Para a conexão com o kit AVR, foi utilizado um acoplador óptico, devido ao fato da haver diferença entre as alimentações. O diagrama em blocos e mais detalhes sobre seu funcionamento encontram-se no capítulo 2.

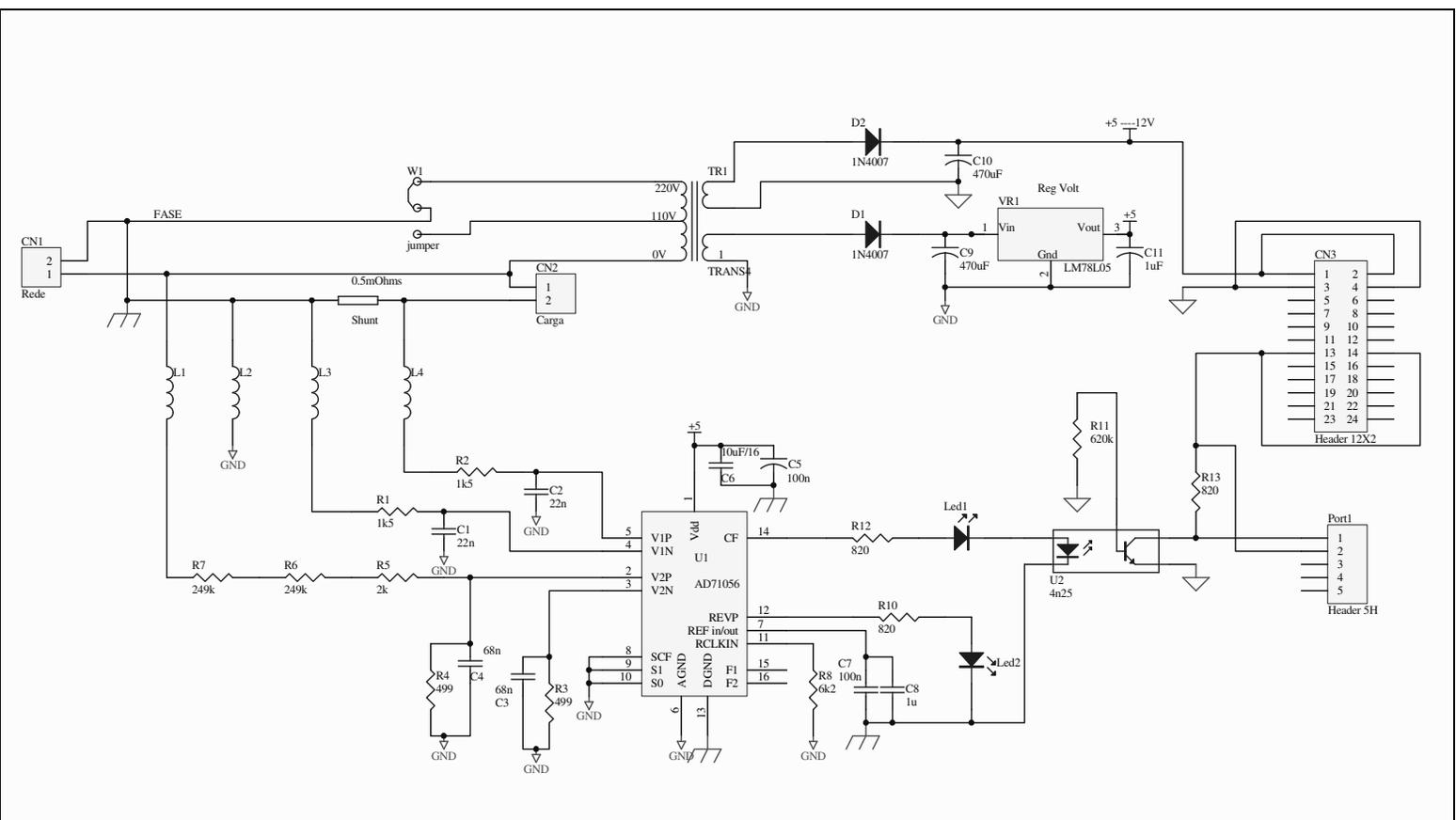


Figura 51 - Diagrama esquemático do módulo tomada

Fonte: Dados do autor

5.4 Módulo Luminária

A medição do consumo de energia gasta com a iluminação de uma residência encontrou uma grande dificuldade que foi a falta de acesso aos pontos de alimentação das luminárias, e por conseqüência a falta de alimentação para os módulos. Para contornar estas, foi projetado um módulo alimentado por baterias com um sensor do tipo foto-transistor. Desta maneira, o sensor registra o período em que a luminária está acesa e no programa do concentrador fica registrado a potência da luminária para posteriormente o registro do seu consumo. Na Figura 52 podemos ver sua imagem e na Figura 53 seu diagrama esquemático.



Figura 52 - Módulo Luminária

Fonte: Dados do autor

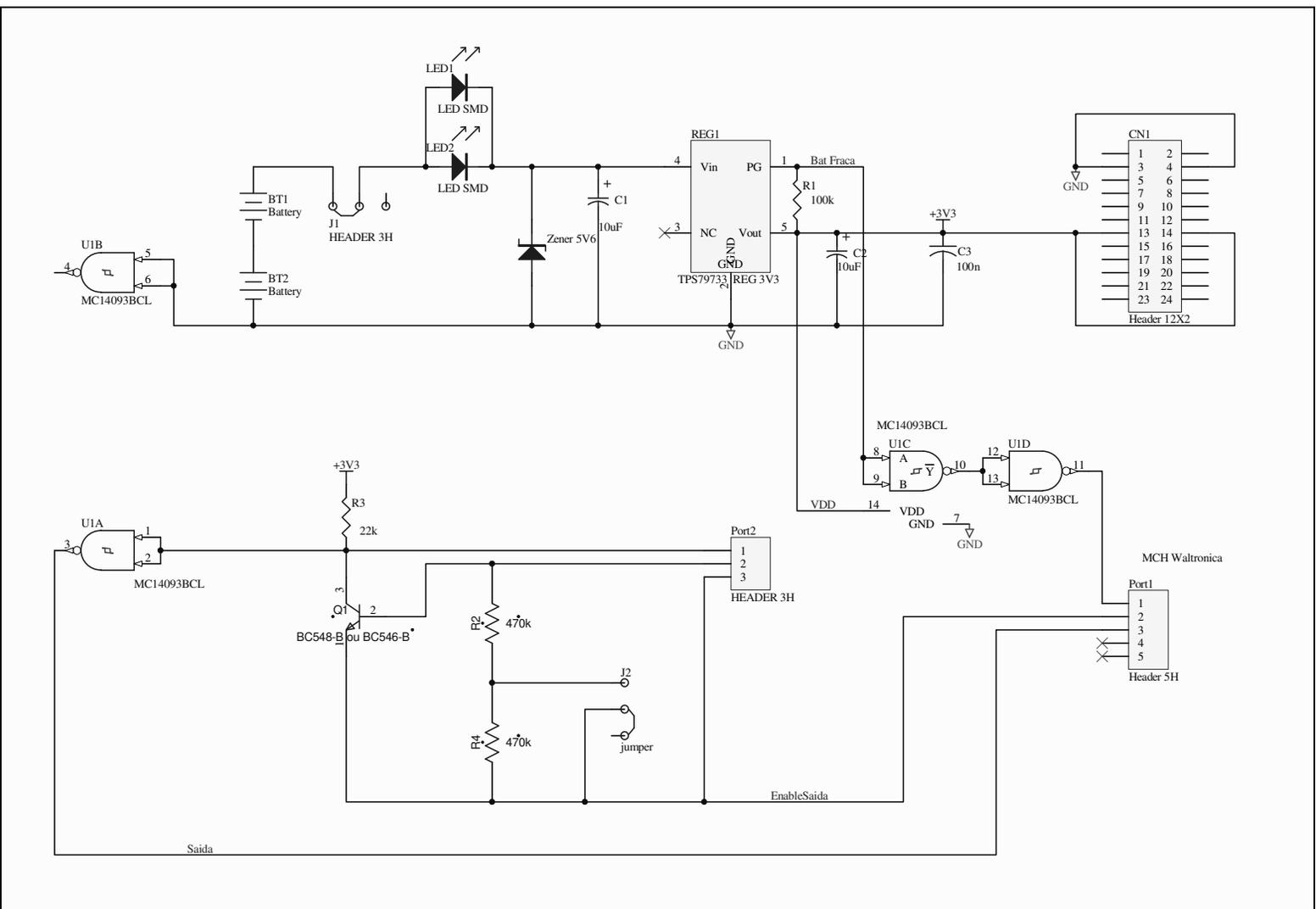


Figura 53 - Diagrama esquemático do módulo luminária

Fonte: Dados do autor

Uma das vantagens do rádio ZigBee é o seu baixo consumo e para prolongar mais a vida útil das baterias, o microcontrolador ATMEGA1284P do kit AVR opera na maior parte do tempo em modo *sleep*, poupando energia. A Figura 54 mostra a imagem do módulo luminária completo.



Figura 54 - Módulo luminária com o kit AVRRAVEN

Fonte: Dados do autor

5.5 Módulo Chuveiro

O módulo chuveiro também encontrou dificuldades na conexão para medição da corrente de consumo e na alimentação. A solução encontrada foi o método de medição indireta e sua alimentação por baterias. Para facilitar sua instalação, o transformador de corrente é do tipo alicate, o que evita a necessidade do desligamento da carga para sua conexão. As Figuras 55 e 56 mostram as imagens do protótipo utilizado.



Figura 55 - Módulo chuvaireiro

Fonte: Dados do autor



Figura 56 - Módulo chuvaireiro com kit AVRRAVEN

Fonte: Dados do autor

O diagrama esquemático pode ser visto na Figura 57 e nele podemos notar que o CI 2 é um *MUX/DEMUX* analógico responsável pelo chaveamento automático de escala e sua seleção é feita pelo microcontrolador do kit AVRRAVEN. Sua saída está conectada ao CI 3 que é um conversor *AC (true RMS)* para *DC*. Este conversor fornece uma tensão analógica proporcional à corrente medida que será lida pelo microcontrolador do kit.

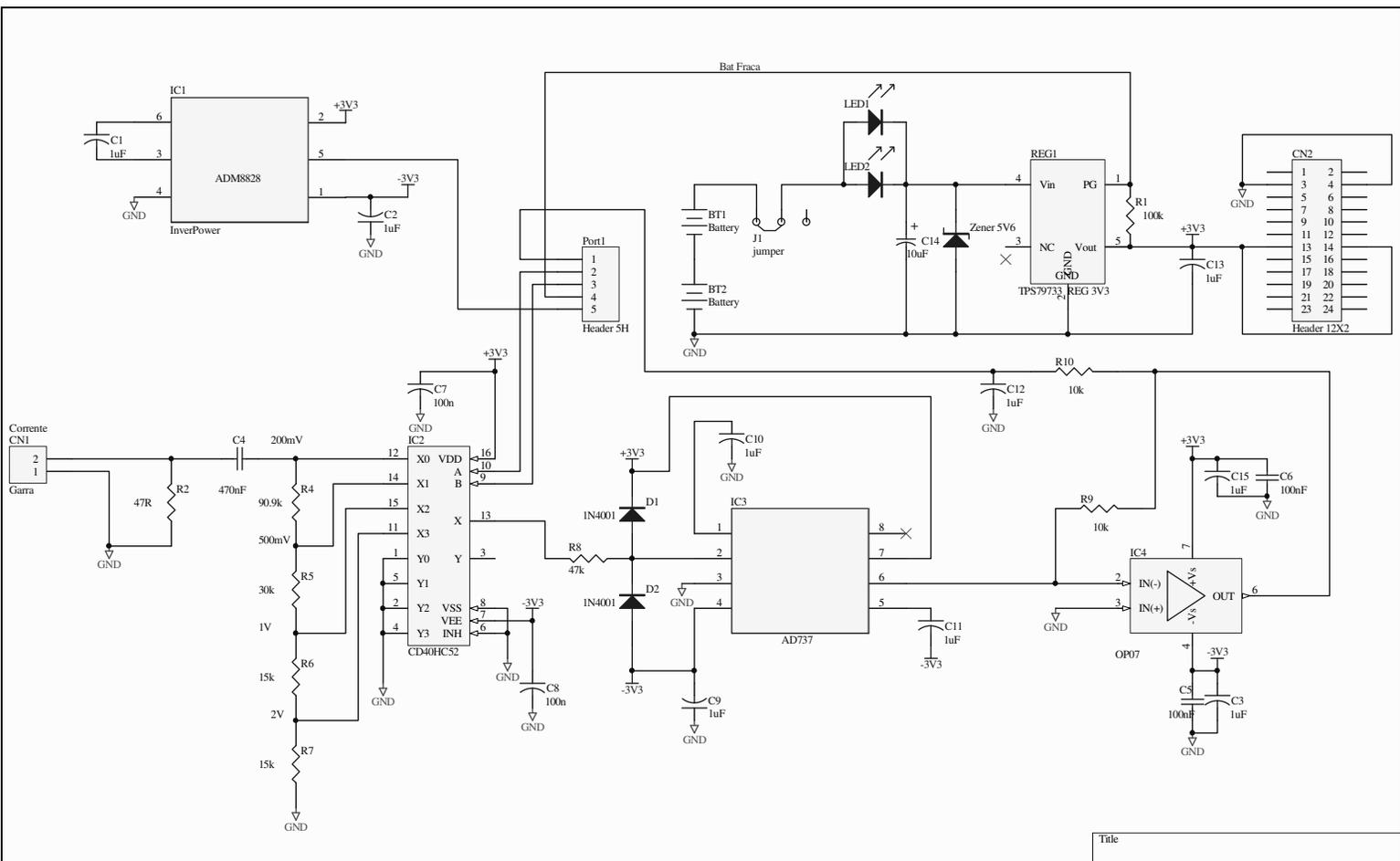


Figura 57 - Diagrama esquemático do módulo chuveiro

Fonte: Dados do autor

6 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

6.1 Introdução

Durante a execução deste trabalho, vários testes parciais foram realizados bem como as simulações de seus circuitos e *firmwares*. Estes testes e simulações ajudaram a corrigir problemas e direcionar o resultado final ao objetivo do trabalho. Este capítulo mostra os resultados obtidos com os testes durante a realização deste trabalho. Este capítulo se propõe também a apresentar os resultados globais do projeto *Breakdown* do consumo de energia elétrica.

6.2 Primeira fase (simulações)

Os testes para o *firmware* se iniciaram com o auxílio do software PROTEUS da empresa *Labcenter Electronics Ltd.*, o que antecipou os resultados enquanto aguardávamos a chegada dos kits da ATMEL e demais componentes. Este software permite a simulação de circuitos eletrônicos e um diferencial é a simulação de microcontrolador e o seu respectivo *firmware*. Com ele foram possíveis os testes do *firmware* de comunicação entre os microcontroladores onde foram introduzidas interferências para o teste da sua eficiência. No princípio dos testes, quando havia interferências introduzidas, foram relatados os seguintes problemas:

- a) interrupção da comunicação;
- b) erros na recepção de informações;
- c) o não restabelecimento automático da comunicação após o término das interferências;
- d) o não restabelecimento automático da comunicação após o reset de um ou ambos microcontroladores.

Na Figura 58 podemos ver a área de trabalho do software com o circuito montado.

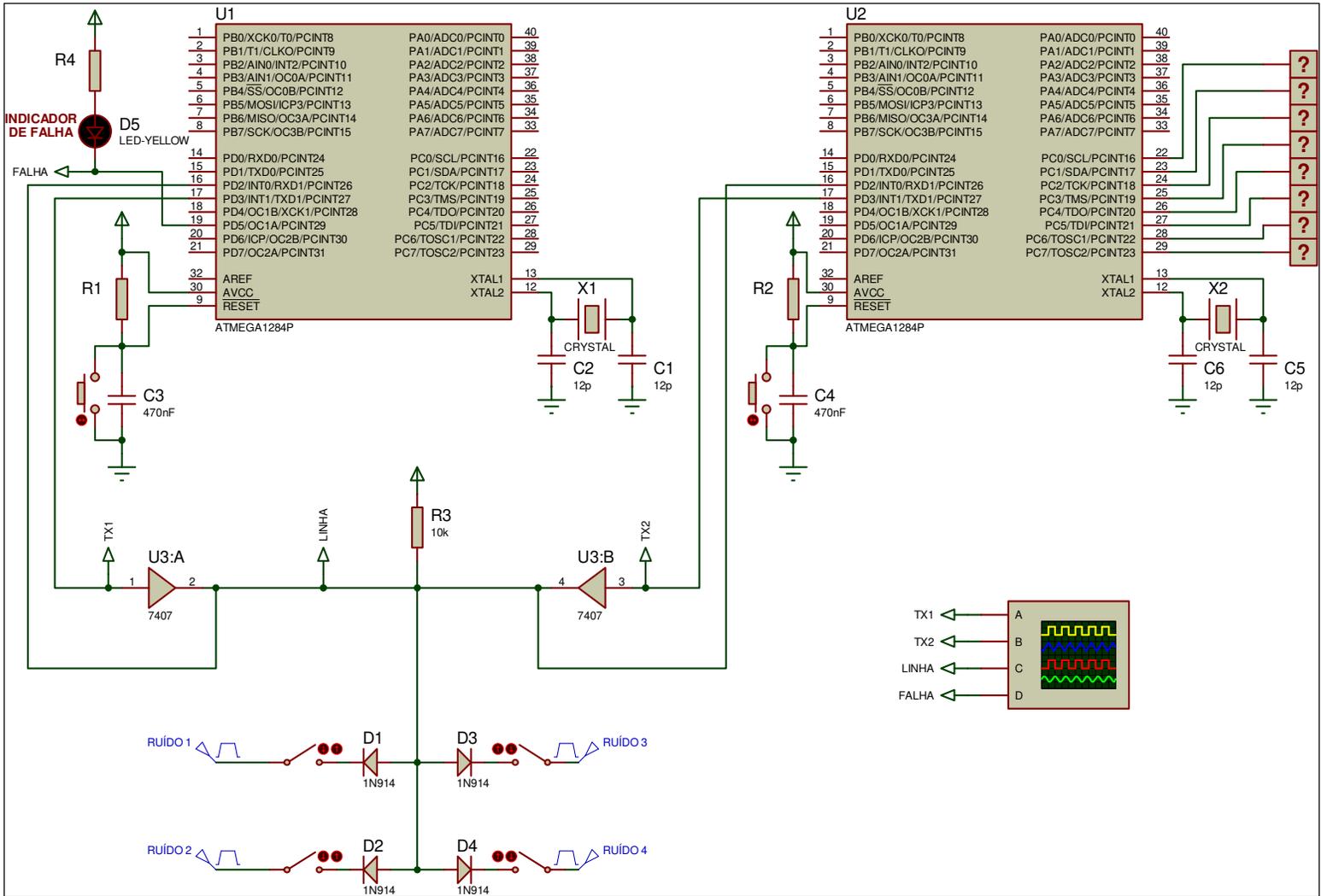


Figura 58 - Área de trabalho do software Proteus

Fonte: Dados do autor

Durante a simulação, um osciloscópio foi utilizado para visualizar a linha de transmissão que na prática será uma rede elétrica residencial. No circuito de simulação os modems foram suprimidos, pois a comunicação fica transparente já que as entradas e saídas dos modems são digitais padrão TTL. Os modems desenvolvidos são bidirecionais e a comunicação é *half-duplex*, o que faz com que cada modem receba o próprio sinal de sua transmissão, o que pôde ser resolvido no *firmware*, desabilitando a recepção quando havia alguma transmissão. Na Figura 59, temos a imagem do osciloscópio durante a simulação, e seus canais mostram os sinais: transmissão do mestre, resposta do escravo, a linha de transmissão e o indicador de falha de recebimento.

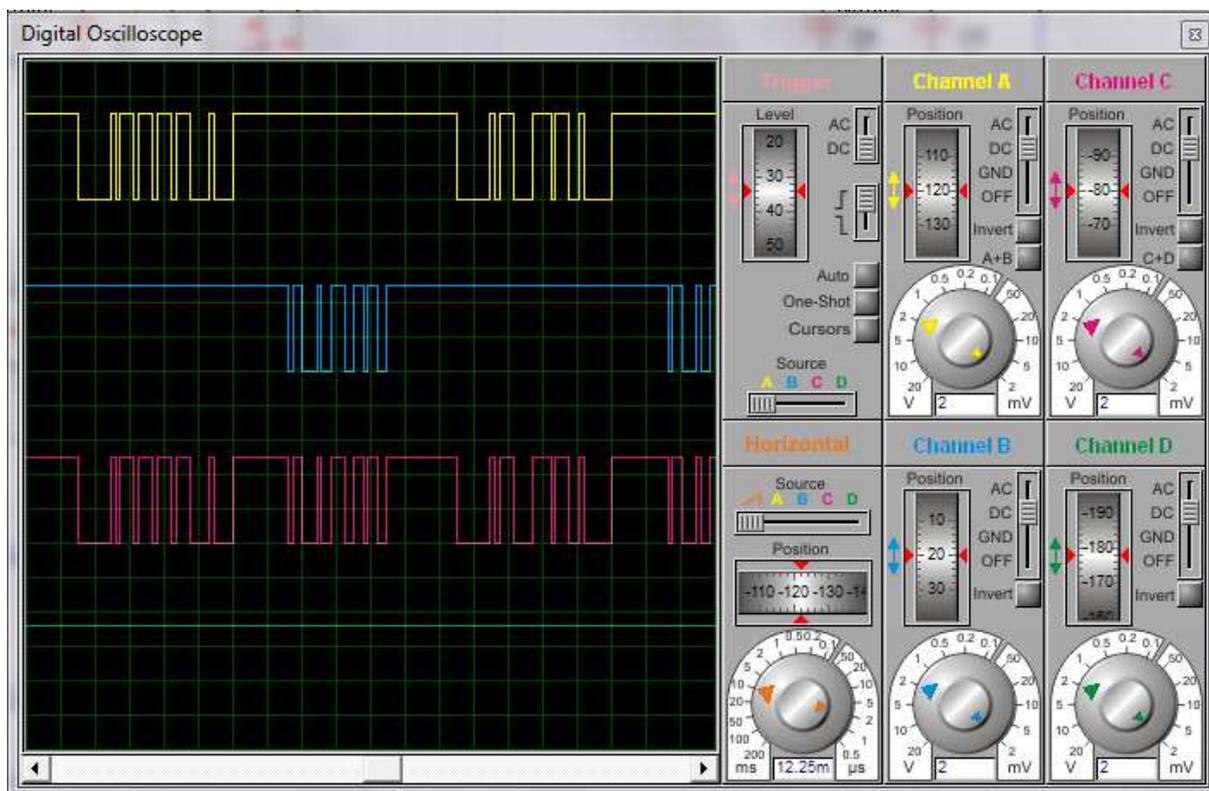


Figura 59 - Osciloscópio do simulador Proteus

Fonte: Dados do autor

A inclusão de ruídos na comunicação teve como finalidade a comprovação da capacidade do *firmware* em detectar erros na recepção, registrá-los e restabelecer a

comunicação assim que possível de modo automático. Na Figura 60, são mostrados os sinais de transmissão do mestre, a linha de transmissão, o ruído e o indicador de falha de recebimento. Neste instante, o transmissor enviou seu frame e o receptor devolveu uma resposta “falsa”, o que gerou uma falha. Durante a falha o transmissor reenvia o mesmo byte até que obtenha uma resposta “verdadeiro” e assim que a falha cessa, o microcontrolador volta à comunicação do ponto em que parou.

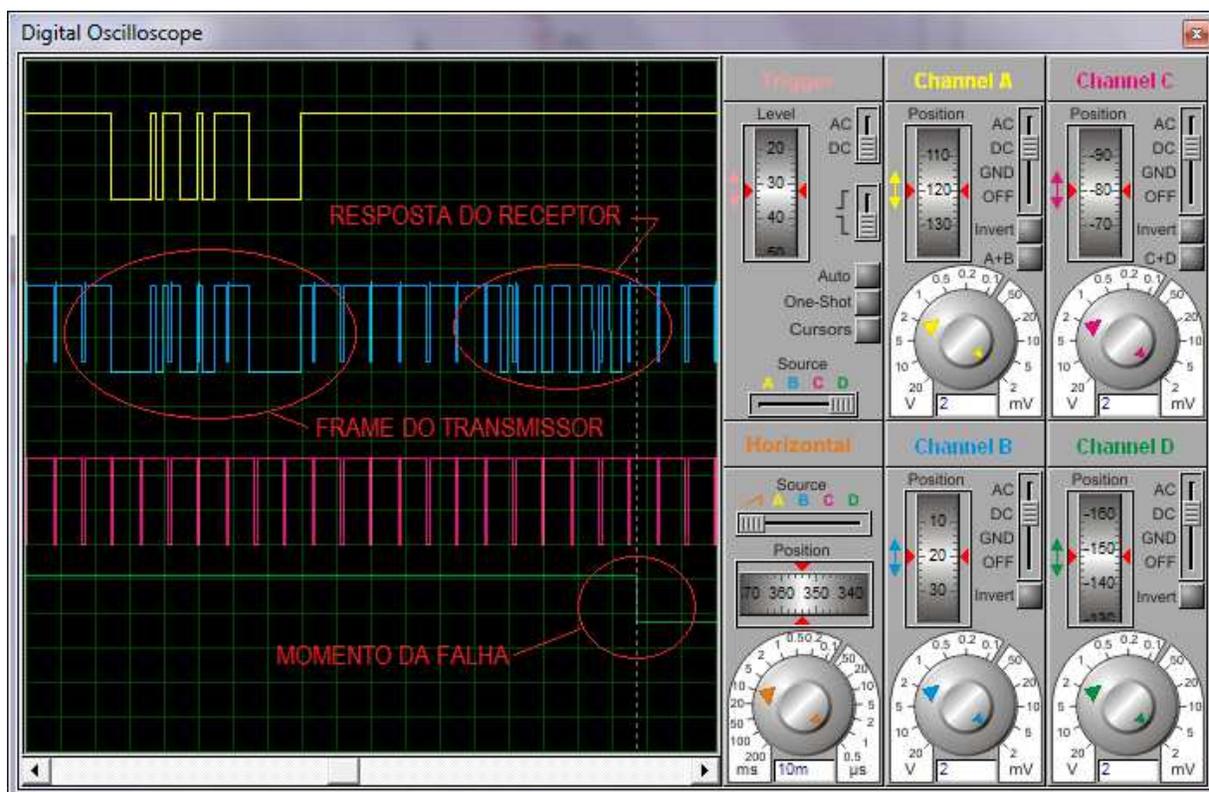


Figura 60 - Osciloscópio simulando falha

Fonte: Dados do autor

6.3 Segunda fase (testes em laboratório)

Após comprovado o funcionamento do *firmware* através do *software* Proteus, foram montadas as placas de circuitos dos modems e cada um foi conectado a um kit ATMEL. Com o auxílio de um *proto-board* foram alimentados e conectados os modems para os testes de comunicação conforme apresentado na Figura 61. A princípio, verificou-se o funcionamento sem a inserção da rede elétrica e na Figura 62 podemos ver a imagem capturada da tela do osciloscópio digital mostrando a portadora do modem.

Com a rede de 127VAC adicionada a nossa rede, verificamos um bom desempenho dos circuitos e ótimos resultados. Na Figura 63 podemos verificar uma ampliação da portadora do modem adicionada à tensão da rede e na Figura 64, o frame do transmissor no canal 1 e o sinal da linha de transmissão com os frames do transmissor e a resposta do receptor no canal 2, que na prática, se mostraram muito similares à simulação como visto na Figura 59.

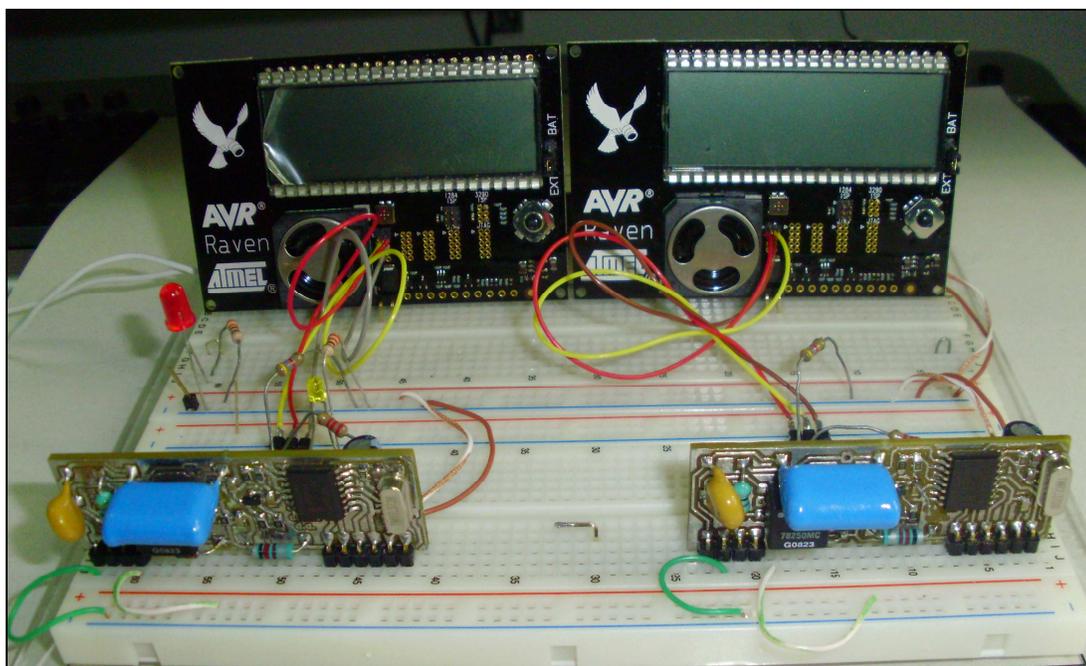


Figura 61 - Teste de comunicação em *proto-board*

Fonte: Dados do autor

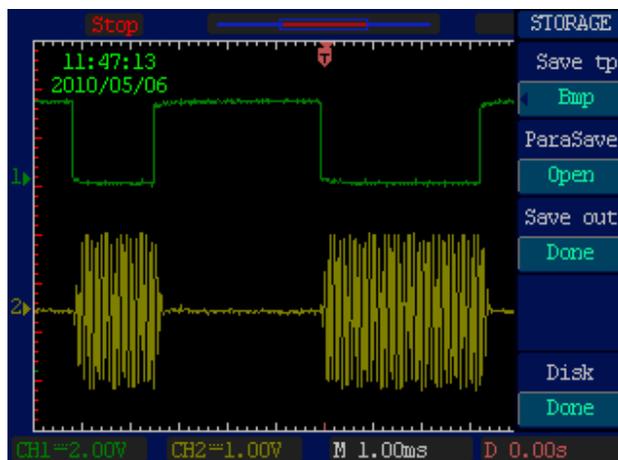


Figura 62 - Portadora do modem PLC

Fonte: Dados do autor



Figura 63 - Portadora sobre a tensão da rede

Fonte: Dados do autor

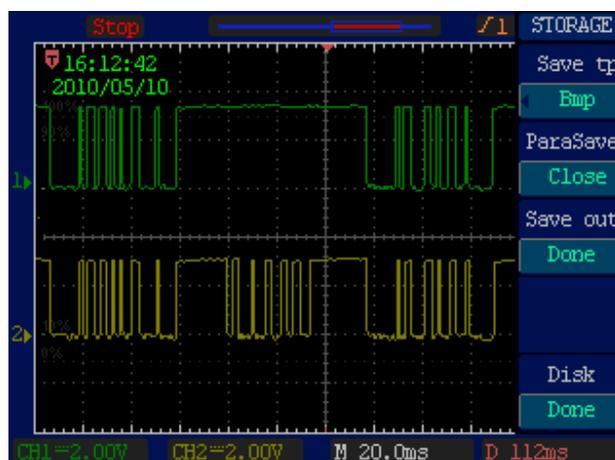


Figura 64 - Comunicação entre modems

Fonte: Dados do autor

6.4 Terceira fase (testes em residência)

Os testes de comunicação do modem PLC foram realizados em uma residência e os resultados obtidos foram compatíveis aos simulados e aos de laboratório. A residência utilizada recebe em seu ponto de entrada uma alimentação bifásica (2 fases e 1 neutro) 220/127V e na Figura 65 podemos ver a planta com os pontos utilizados nos testes de comunicação.

A residência possui um quadro de medição que alimenta os quadros terminais QL1 e QL2. As tomadas utilizadas nos testes apresentam seus circuitos representados ao lado.

Para os testes, um Módulo PLC foi preparado para uma transmissão contínua de Bytes sequenciados, de modo que a cada Byte enviado, aguardava a resposta do Módulo PLC preparado para recepção destes dados. Em uma saída do microcontrolador do Módulo transmissor foi acrescentado um led conforme circuito utilizado no simulador (Figura 58) e a cada transmissão sem sucesso o led ascendia, indicando falha no recebimento do Byte ou estouro por *timeout*. A metodologia utilizada para medir a

eficiência da comunicação foi a medida do *duty-cycle* da saída de falha com o auxílio de um osciloscópio. A Tabela 5 mostra os resultados obtidos entre os vários pontos de teste.

Tabela 5 - Resultados dos testes práticos

Transmissor	Receptor	Fase	Distância aproximada [m]	Falha [%]
Circuito 6	Circuito 6	Mesma	3	<0,4
Circuito 1	Circuito 2	Mesma	7	0,4
Circuito 4	Circuito 4	Mesma	11	0,4
Circuito 1	Circuito 3	Mesma	31	1,2
Circuito 1	Circuito 4	Diferente	17	12,4
Circuito 5	Circuito 6	Diferente	33	16,8
Circuito 4	Circuito 6	Diferente	39	17,2

Fonte: Dados do autor

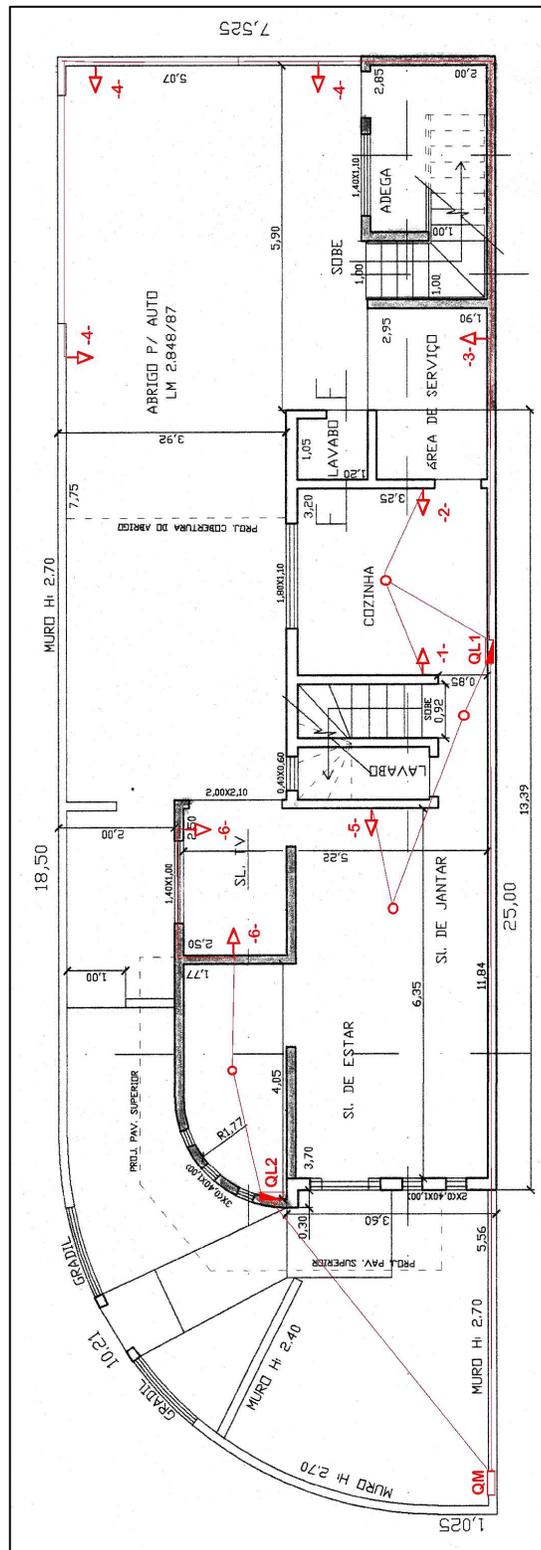


Figura 65 - Planta da residência utilizada nos testes

Fonte: Dados do autor

O período para transmissão de todo o conjunto de 256 Bytes é de 38,4s aproximadamente e o período para transmissão e recepção de cada byte é em média 150ms. Segundo os resultados obtidos, podemos concluir que a distância não causou muita influência na comunicação mas as comunicações entre fases diferentes tiveram uma porcentagem de falhas significativas. Isto se deve ao fato do transformador ser projetado para um melhor rendimento na frequência de trabalho que é 60Hz, o que causa uma atenuação para a transmissão da frequência da portadora do modem que é de 115,2KHz.

Além dos problemas relatados, durante os testes, algumas das falhas foram potencializadas pelo uso de alguns eletrodomésticos, sendo que o que causou a maior interferência foi um monitor de LCD para computador, que gerava um ruído na rede elétrica de uma frequência muito próxima da portadora do modem.

6.5 Testes e resultados do projeto Breakdown

O sistema foi instalado em duas residências, com o objetivo de fazer testes do funcionamento da rede em ambiente real, verificar as dificuldades de instalação e fazer as primeiras coletas de dados no campo.

Os módulos luminária foram calibrados pelo tempo medido da exposição à luz. Os módulos de medida de tomada e de chuveiro foram pré-calibrados em laboratório com cargas conhecidas, para apresentar precisão de $\pm 1,5\%$, que é mais do que suficiente para os objetivos do projeto, que é de identificar onde estão localizados os pontos de desperdício de energia em uma instalação.

Esta calibração foi feita em apenas um dos módulos, e o com o emprego de resistores de precisão (menores do que 0,5% de erro), o resultado da calibração deste módulo pode ser usado em todos os outros, com o erro de medida sendo fundamentalmente dados pelos erros do resistor shunt e os erros intrínsecos ao medidor de energia da *Analog Devices*.

Evidentemente que desvios de $\pm 1,5\%$ em relação à energia real medida não têm o menor impacto nos resultados desejados, e a calibração de apenas um módulo diminui os custos de produção, o que é importante para o projeto.

Os testes foram realizados em duas residências e a residência A tem como característica um alto consumo de energia elétrica e o aquecimento de água é feito por aquecedores solares. Ela teve uma monitoração do consumo por 72 horas e os resultados foram estimados para 30 dias, o que comparador com o mesmo mês do ano anterior apresentou uma variação aceitável. Os resultados obtidos podem ser vistos na Tabela 6.

Tabela 6 - Resultados obtidos na residência A

PONTO DE CONSUMO	Consumo medido em 72h com os módulos (kWh)	Consumo (%)	Consumo estimado em 30 dias (kWh)	Consumo registrado no mesmo mês em 2010 (kWh)	Consumo estimado em 30 dias (R\$ 0,4373/kWh)
Computador, monitor e caixas de som	2,1123	10,38%			R\$ 27,71
Home theater	0,0002	0,00%			R\$ 0,00
Panela arroz	0,3084	1,58%			R\$ 4,05
Receptor TV a cabo	0,5009	2,57%			R\$ 6,57
Esteira ergométrica em <i>standby</i>	0,4365	2,24%			R\$ 5,73
Computador 2 e monitor	3,7845	19,40%			R\$ 49,65
Computador 3, monitor, roteador e laptop	3,6056	18,48%			R\$ 47,30
Base de telefone sem fio	0,1731	0,89%			R\$ 2,27
TV LCD 43"	3,2606	16,71%			R\$ 42,78
Forno micro-ondas	0,1101	0,56%			R\$ 1,44
Luminária sala 120W	0,0093	0,05%			R\$ 0,12
Geladeira e freezer conjugados	3,1917	16,36%			R\$ 41,87
TV LCD 53"	1,7564	9,00%			R\$ 23,04
Luminária cozinha 160W	0,2545	1,30%			R\$ 3,34
Luminária closet 50W	0,0040	0,02%			R\$ 0,05
Totais	19,508	100,00%	585,25	561	R\$ 255,95

Fonte: Relatório Projeto Breakdown

Na residência B, a monitoração foi realizada durante alguns dias e após uma breve análise, o proprietário pode perceber que havia alguns equipamentos ligados desnecessariamente. Após uma mudança de comportamento, obteve uma redução no

seu consumo se comparado com o mesmo mês do ano anterior, o que promove uma comparação mais fiel, já que o consumo varia com a sazonalidade.

Na Tabela 7 temos estas informações registradas e nas Figuras 66 e 67 temos cópias das contas de energia elétrica dos meses do estudo.

Tabela 7 - Economia na residência B

Mês	Consumo medido em 2010	Dias/mês em 2010	Consumo medido em 2011	Dias/mês em 2011	Economia
Fevereiro	764KWh	29	579KWh	28	21%
Março	614KWh	28	538KWh	31	21,5%

Fonte: Relatório Projeto Breakdown

PREZADO (A) CLIENTE		DADOS DA UNIDADE CONSUMIDORA					
Ajude as vítimas da chuva no Rio de Janeiro. Acesse http://www.cpfl.com.br/rio e saiba como.		RESIDÊNCIA B JD MANACAS 13140-000 PAULÍNIA/SP CLASSIFICAÇÃO: B1 Residencial Tensão Nominal: 220 / 127 V-Bifásico					
ATENDIMENTO CPFL	SEU CÓDIGO	CONTA MÊS	VENCIMENTO	TOTAL A PAGAR (R\$)			
0800 0 10 10 10 www.cpfl.com.br	39004775	FEV/2011	09/03/2011	255,57			
HISTÓRICO DE CONSUMO	KWh	Dias	DATAS DAS LEITURAS	DISCRIMINAÇÃO DA OPERAÇÃO - RESERVADO AO FISCO			
2011 FEV	579	28	Atual 22/02/2011	Nº578000293474	Quantidade	Preço Médio	Valor (R\$)
JAN	750	33	Anterior 26/01/2011	Venda de Energia (kWh)	579	0,44139890	255,57
2010 DEZ	751	29	Nº de dias 28	DESCRIÇÃO DA CONTA			
NOV	607	31	Próximo Mês 25/03/2011	Nº578000293474	Quantidade	Tarifa/Preço	Valor (R\$)
OUT	630	30		Consumo Faturado [kWh]	579	0,30770000	178,16
SET	561	31		PIS/PASEP			2,40
AGO	900	30		COFINS			11,12
JUL	991	32		ICMS			63,89
JUN	838	30		Total CPFL			255,57
MAI	604	26					
ABR	639	33					
MAR	614	28					
FEV	764	29					

Figura 66 - Conta de energia de fevereiro da residência B

Fonte: Relatório Projeto Breakdown

PREZADO(A) CLIENTE		DADOS DA UNIDADE CONSUMIDORA				
Dengue. Se você agir podemos evitar. Acesse www.combatadengue.com.br e saiba mais.		RESIDÊNCIA B				
		JD MANACAS 13140-000 PAULÍNIA/SP CLASSIFICAÇÃO: B1 Residencial Tensão Nominal: 220 / 127 V-Bifásico				
ATENDIMENTO CPFL	SEU CÓDIGO	CONTA MÊS	VENCIMENTO	TOTAL A PAGAR (R\$)		
☎ 0800 0 10 10 10 www.cpfl.com.br	39004775	MAR/2011	11/04/2011	235,71		
HISTÓRICO DE CONSUMO	DATAS DAS LEITURAS		DISCRIMINAÇÃO DA OPERAÇÃO - RESERVADO AO FISCO			
2011 MAR ██████████ 530 31	Atual	25/03/2011	Nº575500333213	Quantidade	Preço Médio	Valor (R\$)
FEV ██████████ 570 28	Anterior	22/02/2011	Venda de Energia (kWh)	538	0,43812268	235,71
JAN ██████████ 750 33	Nº de dias	31	DESCRIÇÃO DA CONTA			
2010 DEZ ██████████ 751 28	Próximo Mês	26/04/2011	Nº575500333213	Quantidade	Tarifa/Preço	Valor (R\$)
NOV ██████████ 607 31	LEITURAS		Consumo Faturado [kWh]	538	0,30770000	165,54
OUT ██████████ 630 30	Atual	15128	PIS/PASEP			2,00
SET ██████████ 561 31	Anterior	14590	COFINS			9,24
AGO ██████████ 906 30	Fat. Multip.	1	ICMS			58,93
JUL ██████████ 991 32	Consumo kWh	538	Total CPFL			235,71
JUN ██████████ 838 30	Nº. Medidor	208891846				
MAI ██████████ 604 29	INDICADORES DE CONTINUIDADE DO FORNECIMENTO DE ENERGIA					
ABR ██████████ 639 33						
MAR ██████████ 614 28						

Figura 67 - Conta de energia de março da residência B

Fonte: Relatório Projeto Breakdown

7 CONCLUSÃO

A comunicação de dados pela rede elétrica não é uma tarefa muito simples, já que esta não é sua principal finalidade e, a sua utilização fim traz vários problemas a serem contornados. Elaborado através de uma visão geral, este trabalho mostra que é possível tal comunicação com um baixo custo, pequenas dimensões e com as características necessárias ao projeto *Breakdown*.

Este é o resultado de um estudo que exigiu, no decorrer do mesmo, o conhecimento, a compreensão, a análise e a aplicação de vários conceitos relacionados ao tema. Mostra a sequência e a integração entre as diversas partes que formam um projeto.

Diversos passos foram necessários para sua conclusão, que se iniciou com o estudo sobre modulação, redes, comunicação de dados pela rede elétrica, entre outros. A escrita e depuração de *firmware* para família ATMEL em linguagem C, a simulação de *hardware* e *firmware*, a confecção de layout profissional de placas e a montagem manual em SMD dos protótipos, transformaram este em um trabalho bastante completo.

A virtualização de partes do desenvolvimento, como a simulação do *hardware* e *firmware* do transmissor, simultaneamente com o *hardware* e *firmware* do receptor e a emulação de ruídos pertinentes a rede elétrica, permitiram a correção dos vários erros de comunicação, antes mesmo da confecção dos protótipos. Isto traz um real ganho de tempo e qualidade na elaboração de qualquer trabalho que relacione eletrônica e microcontroladores com seu respectivo *firmware*.

Este trabalho abre ainda a possibilidade da sua continuidade, onde um modem com método de modulação mais eficiente e imune a ruídos seja utilizado, um protocolo de comunicação que possa recuperar possíveis dados perdidos, bem como um estudo mais aprofundado sobre o acoplamento entre fases que se mostrou necessário.

Desta forma, espero que este projeto na sua totalidade possa realmente colaborar com a conservação da energia elétrica nas residências ou na conscientização dos usuários, resultando em uma redução real no seu consumo, causando uma expressiva redução no impacto ambiental.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica.. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/>>. Acesso em: 18, mai. 2010.
- [2] AES Eletropaulo.. Disponível em: <http://www.eletropaulo.com.br>. Acesso em: 18, mai. 2010.
- [3] IASC. **Índice ANEEL de Satisfação do Consumidor**: relatório. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/ELETROPAULO%202009.pdf>>. Acesso em: 22, mai. 2010.
- [4] NANSEN. **Medidor eletromecânico monofásico**. Disponível em: <http://www.nansen.com.br/produtos_medidores_eletromecanicos_monofasicos.php>. Acesso em: 10, jun. 2010.
- [5] P3 INTERNATIONAL. **Medidor de energia eletrônico**. Disponível em: <<http://www.p3international.com/products/p4460.html>>. Acesso em: 10, jun. 2010.
- [6] INSTRUTHERM. **Analizador de energia digital portátil**. Disponível em: <http://www.instrutherm.com.br/?gclid=CNutmuav_qkCFYsd2god1xaQyA>. Acesso em: 10, jun. 2010.
- [7] ANALOG DEVICES. **AD71056. Datasheet**, Analog Devices, Inc., 2006. Disponível em: <http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD71056.pdf>. Acesso em 10, jul. 2010.
- [8] TANENBAUM, Andrew S. **Computer networks**. 4. ed. Upper Saddle Rives: Prentice-Hall, 2003. 891 p
- [9] BOLZANI, Caio Augustus Morais. **Residências inteligentes**. São Paulo: Livraria da Física, 2004. 332 p.
- [10] ZIGBEE. **ZigBee Alliance**. Disponível em: <<http://www.zigbee.org/>>. Acesso em: 12, Jul. 2010.

[11] DOSTERT, K. **Powerline Communications**. Upper Saddle River: Prentice Hall PTR, 2001.

[12] Wikimedia. Imagem X10_1. Disponível em: <http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/2/27/X10_1.jpg>. Acesso em: 13, jul. 2010.

[13] Wikimedia. Imagem X10_5. Disponível em: <http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/d/d9/X10_5.jpg>. Acesso em: 13, Jul. 2010.

[14] VARILUME. **Powerline modules**. Disponível em: <<http://www.varilume.com>>. Acesso em 13, Jul. 2010.

[15] NXP. TDA5051A. Disponível em: <<http://www.nxp.com/pip/TDA5051A.html>>. Acesso em: 18, Mai. 2010.

[16] ATMEL. **ATmega1284P**. Disponível em: <http://www.atmel.com/dyn/products/product_card.asp?part_id=4331>. Acesso em 15, Jul. 2010.

[17] ATMEL. **Kit RZRAVEN**. Disponível em: <http://atmel.com/dyn/resources/prod_documents/doc8117.pdf>. Acesso em: 15, Jul. 2010.

DUARTE, Luís F. C., Zambianco, José D., AIROLDI, Douglas, FERREIRA, Elnatan C., DIAS, José A. Siqueira. Characterization and breakdown of the electricity Bill using custom smart meters: a tool for energy-efficiency programs. **International Journal of Circuits Systems and Signal Processing**. Bulgaria, v.5., n. 2., p. 116-123, 2011.

Apêndice A – Firmware do transmissor

```

//*****
//***
//***PROTOCOLO DE COMUNICAÇÃO PLC - TRANSMISSOR
//***PROJETO BREAKDOWN
//***AUTOR: DOUGLAS AIROLDI
//***
//*****

/* INCLUDES */
#include <avr/io.h>
#include <avr/delay.h>
#include <avr/interrupt.h>
char estado = 0;
char dado_a_tx;
char crc;
int dividendo;
char resultado = 0;
char erros = 0;
char acertos = 0;
char janela=0;
char recebido=0;
char recebido1=0;
char recebido2=0;
char transmitido=0;
char idle=0;
char t_idle=0;
char estado_tx = 0;
char timeout = 0;

//*****
//***VETOR DE INTERRUPÇÃO TIMER2***
//*****
ISR(TIMER2_OVF_vect)
{

//DETCOR DE IDLE
if(PIND & (1<<PIND2))
{t_idle++;}
else{t_idle=0;}
if(t_idle >= 24)
{ idle=1;}
else
{ idle=0;}

```

```

switch (janela)
{
  case 0: //HABILITA TRANSMISSÃO E SEU VETOR DE INTERRUPTÃO,
          //CALCULA O CRC E INICIA TRANSMISSÃO DO FRAME POR '@'
          if((dado_a_tx) && (idle) )
          {
            UCSR1B=((0<< RXEN1 ) | (1<< TXEN1 ) | (0<< RXCIE1) | (1<<
TXCIE1));
            dividendo = ( dado_a_tx <<5 );
            dividendo = ( dividendo % 19);
            crc = dividendo;
            UDR1 = '@';
            janela++;
          }
          break;
  case 1: //APÓS TRANSMITIDO, HABILITA RECEPÇÃO E SEU VETOR DE
          //INTERRUPTÃO
          if(transmitido)
          {
            transmitido=0;
            UCSR1B=((1<< RXEN1) | (1<< TXEN1) | (1<< RXCIE1) | (0<<
TXCIE1));
            janela++;
          }
          break;
  case 2:
          timeout++;
          if(timeout==150)          //TESTA ESTOURO POR TIMEOUT,
REGISTRA O
          //RESULTADO E PREPARA PARA
REENVIAR
          {
            janela=0;
            resultado = 0x10; //REGISTRA DATA LINK SCAPE CONFORME
//TABELA ASCII

            erros++;
            PORTD = (0<<PIND5);
            dado_a_tx=0;
            timeout = 0;
            UCSR1B=((1<< RXEN1) | (1<< TXEN1) | (0<< RXCIE1) | (0<<
TXCIE1));
            break;
          }
          if(recebido)          //TESTA A RECEPÇÃO E REGISTRA O
RESULTADO 'V'
          //PARA VERDADEIRO E 'F' PARA
FALSO
          {

```

```

        janela=0;
        dado_a_tx=0;
        recebido=0;
        timeout = 0;
        if((recebido1=='#')&&(recebido2==0x36))
        {
            resultado = 0x36;
            acertos++;
            PORTD = (1<<PIND5);
        }
        else
        {
            resultado = 0x26;
            erros++;
            PORTD = (0<<PIND5);
        }
    }
    break;
default:
    break;
}
}

/*****
/****VETOR DE INTERRUPÇÃO USART1-TX ****
/*****
ISR(USART1_TX_vect)
{
switch(estado_tx)
{
    case 0 :    //ENVIA '@'
        UDR1 = dado_a_tx;
        estado_tx++;
        break;
    case 1 :    //ENVIA CRC
        UDR1 = crc;
        estado_tx++;
        break;
    case 2 :    //FIM DE TRANSMISSÃO
        estado_tx=0;
        transmitido=1;
        break;
    default:
        break;
}
}
}

```

```

/*****
/**VETOR DE INTERRUÇÃO USART1-RX **
/*****
ISR(USART1_RX_vect)
{
switch(estado)
{
case 0 : //RECEBE PRIMEIRO CARACTER
PORTA=1;
recebido1 = UDR1;
estado++;
break;
case 1 : //RECEBE SEGUNDO CARACTER E DESABILITA
RECEPÇÃO
recebido2 = UDR1;
estado=0;
recebido=1;
PORTA=0;
UCSR1B=((0<< RXEN1) | (1<< TXEN1) | (0<< RXCIE1) | (0<<
TXCIE1));
break;
default:
break;
}
}
}

```

```

/* PROTÓTIPOS DE FUNÇÕES */
void USART1_Init( unsigned int baudrate );
unsigned char i;

```

```

/*****
/**PROGRAMA PRINCIPAL **
/*****
int main( void )
{
//DESABILITA INTERRUÇÃO PELO TIMER2
TIMSK2 = ((0<<OCIE2B) | (0<<OCIE2A) | (0<<TOIE2));

//SELECIONA FONTE DO CLOCK PARA 8MHz INTERNO
ASSR = 0x00;

//limpa TCNT2, OCR2A e B, e configura TCCR2 com preescaler de 32
TCNT2 = 0;
OCR2A = 0;
OCR2B = 0;

```

```

TCCR2A = 0;
TCCR2B = ((0<<CS22) | (1<<CS21) | (1<<CS20));

//HABILITA INTERRUPTOES
TIMSK2 = ((0<<OCIE2B) | (0<<OCIE2A) | (1<<TOIE2));

USART1_Init( 832 );           //832 corresponde a 600,24 baud a 8MHz
DDRA = 0x00;
 DDRB = 0xFF;
 DDRC = 0x00;
 DDRD = (( 1<< DDD5));

//HABILITA INTERRUPTO GLOBAL
sei();

//LOOP AGUARDANDO UM VALOR SER ESCRITO EM "dado_a_tx" PARA
//INICIAR A TRANSMISSAO. O RESULTADO É GRAVADO EM "resultado" E
//PODE SER 'V' (0x36), 'F' (0x26) OU DLE (0x10)
while(1)
{
    if(!dado_a_tx)
    {
        i++;                //incremento do byte a ser transmitido para teste
        dado_a_tx = i;      //neste caracter deve ser escrito o byte a ser
transmitido
    }

}

}

//*****
//***CONFIGURAÇÃO USART1 ***
//*****
void USART1_Init( unsigned int baudrate )
{
    //configura baud rate
    UBRR1H = (unsigned char) (baudrate>>8);
    UBRR1L = (unsigned char) baudrate;

    //habilita USART1 e desabilita sua interrupção para TX e RX
    UCSR1B = ( ( 1 << RXEN1 ) | ( 1 << TXEN1 ) | ( 0 << RXCIE1 ) | ( 0 << TXCIE1
));
    //ajusta o frame para 8 dados e 2 stop bits
    UCSR1C = (1<<USBS1)|(1<<UCSZ11)|(1<<UCSZ10);
}

```

Apêndice B – Firmware do receptor

```

//*****
//***
//*** PROCOLO DE COMUNICAÇÃO PLC - RECEPTOR ***
//*** PROJETO BREAKDOWN ***
//*** AUTOR: DOUGLAS AIROLDI ***
//***
//*****

/* Includes */
#include <avr/io.h>
#include <avr/delay.h>
#include <avr/interrupt.h>

/* Prototypes */
void USART1_Init( unsigned int baudrate );
unsigned char USART1_Receive( void );
void USART1_Transmit( unsigned char data );

unsigned char Calcula_crc( unsigned char dado_rx );
unsigned char Recebe_tudo ( void );
void Envia_resposta ( unsigned char resposta );
char dado_rx;
char crc;
char resultado;
char estado = 0;
char t_idle = 0;
char idle = 0;
char recebido = 0;
char janela = 0;

//*****
//*** VETOR DE INTERRUPTÃO TIMER2 ***
//*****
ISR(TIMER2_OVF_vect)
{
    //DETCOR DE IDLE
    if(PIND & (1<<PIND2))
    {t_idle++;}
    else{t_idle=0;}
    if(t_idle >= 20)
    { idle=1;}
    else
    { idle=0;}

    switch(janela)

```

```

{
    case 0:          //HABILITA RECEPÇÃO
        USART1_Init( 832 );
        UCSR1B = ((1<< RXEN1 ) | (1<< TXEN1 ) | (1<< RXCIE1) |
(0<< TXCIE1 ));
        resultado = 0;
        recebido = 0;
        janela++;
        break;

    case 1:          //TESTE SE JÁ RECEBEU
        if(resultado)
        {
            janela++;
            break;
        }
        else
        {
            break;
        }

    case 2:          //HABILITA TRANSMISSÃO
        if( idle )
        {
            janela++;
            //HABILITA INTERRUPT TX
            USART1_Init( 832 );
            UCSR1B = ((1<< RXEN1) | (1<< TXEN1) | (0<<
RXCIE1) | (1<< TXCIE1));
            UDR1= 0x23;          //INICIA A TRANSMISSÃO
            //CABEÇALHO '#'
            break;
        }
        else
        {
            break;
        }

    case 3:          //TESTA SE JÁ TRANSMITIU
        if( !(resultado) )
        {
            janela=0;
            break;
        }
        break;
}
}

```

```

//*****
/** VETOR DE INTERRUÇÃO RX **
//*****
ISR(USART1_RX_vect)
{
switch(estado)
{
case 0 : //RECEBE CABEÇALHO E TESTA SE BYTE
RECEBIDO PELA SERIAL É '@'
recebido = UDR1;
if (recebido == 0x40)
{
estado++;
break;
}
else
{
estado=0;
break;
}
case 1 : //RECEBE DADO TRANSMITIDO, ARMAZENA
E
//CALCULA CRC ESPERADO
dado_rx = UDR1;
crc = ( ( dado_rx <<5 ) % 19 );
estado++;
PORTC = dado_rx;
break;
case 2 : //RECEBE CRC, CONFERE COM O
CALCULADO E
//REGISTRA 'V' OU 'F' EM resultado
recebido = UDR1;
if (recebido == crc)
{
resultado=0x36;/'V';
}
else
{
resultado=0x26;/'F';
}
recebido=0;
crc=0;
estado=0;
break;
}
}

```

```

//*****
//***  VETOR DE INTERRUÇÃO TX  ***
//*****
ISR(USART1_TX_vect)
{
switch(estado)
{
case 0 :          //CARREGA O RESULTADO DA RECEPÇÃO
    UDR1 = resultado;
    estado++;
    break;
case 1 :          //TRANSMITE O RESULTADO DA RECEPÇÃO
    estado=0;
    resultado=0;
    break;
}
}

//*****
//***  PROGRAMA PRINCIPAL  ***
//*****
int main( void )
{

//DESABILITA INTERRUÇÃO PELO TIMER2
TIMSK2 = ((0<<OCIE2B) | (0<<OCIE2A) | (0<<TOIE2));

//SELECIONA FONTE DO CLOCK PARA 8MHz INTERNO
ASSR = 0x00;

//limpa TCNT2, OCR2A e B, e configura TCCR2 com prescaler de 32
TCNT2 = 0;
OCR2A = 0;
OCR2B = 0;
TCCR2A = 0;
TCCR2B = ((0<<CS22) | (1<<CS21) | (1<<CS20));

//HABILITA INTERRUÇÕES
TIMSK2 = ((0<<OCIE2B) | (0<<OCIE2A) | (1<<TOIE2));

USART1_Init( 832 ); // 832 corresponde a 600,24 baud a 8MHz
DDRC = 0xFF;
DDRB = 0xFF;
DDRA = 0x00;
DDRD = (( 1<< DDD5) | (1<< DDD3));
}
}

```

```

unsigned char i;

//HABILITA INTERRUPTÃO GLOBAL
sei();

while(1)
{
    //AQUI FICA O PROGRAMA PRINCIPAL QUE CONTROLA
    //A REDE ZIGBEE
}
}

//*****
//*** CONFIGURAÇÃO USART1 ***
//*****
void USART1_Init( unsigned int baudrate )
{
    //configura baud rate
    UBRR1H = (unsigned char) (baudrate>>8);
    UBRR1L = (unsigned char) baudrate;

    //habilita USART1 e desabilita sua interrupção para TX e RX
    UCSR1B = ((1<< RXEN1) | (1<< TXEN1) | (1<< RXCIE1) | (0 << TXCIE1));

    //ajusta o frame para 8 dados e 2 stop bits
    UCSR1C = (1<<USBS1)|(1<<UCSZ11)|(1<<UCSZ10);
}

```