



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

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**PROPOSTA DE PLATAFORMA DE BAIXO CUSTO PARA REDES AD HOC:
ESTUDO DE COMUNICAÇÃO POR INFRAVERMELHO**

JOÃO LUCAS DE OLIVEIRA TORRES

SOBRAL - CE

2015

**PROPOSTA DE PLATAFORMA DE BAIXO CUSTO PARA REDES AD HOC:
ESTUDO DE COMUNICAÇÃO POR INFRAVERMELHO**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido a banca examinadora do Departamento de Engenharia Elétrica, do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito obrigatório à obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Dr. Rômulo Nunes de Carvalho Almeida.

SOBRAL - CE

2015

Página reservada para ficha catalográfica que deve ser confeccionada após apresentação e alterações sugeridas pela banca examinadora.

Para solicitar a ficha catalográfica de seu trabalho, acesse o site: www.biblioteca.ufc.br, clique no banner Catalogação na Publicação (Solicitação de ficha catalográfica)

JOÃO LUCAS DE OLIVEIRA TORRES

**PROPOSTA DE PLATAFORMA DE BAIXO CUSTO PARA REDES AD HOC:
ESTUDO DE COMUNICAÇÃO POR INFRAVERMELHO**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido a banca examinadora do Departamento de Engenharia Elétrica, do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito obrigatório à obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Aprovada em: 26/06/2015.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Rômulo Nunes de Carvalho Almeida (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Vandilberto Pereira Pinto
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Kildary Aguiar de Santana
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Dedicatória:

Dedico este trabalho aos meus Pais Luciano e Irismar, que fizeram de mim o que sou hoje.

Dedico também a meu Irmão Luciano Filho, meu melhor amigo, com quem sempre posso contar.

E dedico a minha companheira Yara, por estar sempre ao meu lado.

AGRADECIMENTO

Agradeço em primeiro lugar a Deus, que me deu as oportunidades e a força para seguir em frente sempre.

Ao Prof. Dr. Rômulo Nunes de Carvalho Almeida, pela excelente orientação e apoio nessa jornada.

Aos professores participantes da banca examinadora Dr. Vandilberto Pereira Pinto e Killdary Aguiar de Santana pelo tempo, pelas valiosas colaborações e sugestões.

E aos verdadeiros amigos que conquistei na Universidade, dividir as dificuldades com vocês tornou esta jornada muito mais leve.

RESUMO

Este trabalho mostra o desenvolvimento de uma plataforma de hardware e software para rede ad hoc, esta plataforma pode ser usado em pesquisas acadêmicas ou amadores e aplicações práticas também. Esta plataforma consiste em um hardware de baixo custo, que utiliza canais infravermelhos para adquirir uma forma simples e segura de se comunicar. O desenvolvimento de firmware foi focada no protocolo de rede, este foi projetado para ser simples e oferecer as funcionalidades mínimas de transmissão roteamento e multihop que poderia ser executado no hardware limitado.

Palavras-chave: Sistemas embarcados. Rede Ad Hoc. Hardware de baixo custo.

ABSTRACT

This paper shows the development of a Ad Hoc Network hardware and software platform, this platform can be used in academic or hobbyist research and practical applications too. This platform consist into a low cost hardware which utilizes infrared channels to acquire a simple and secure way to communicate. The firmware development was focused on the network protocol, this was designed to be simple and offer the minimal functionalities of routing and multihop transmission which could run on the limited hardware.

Keywords: Embedded Systems. Ad Hoc Network. Low Cost Hardware.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 01. Circuito da Fonte sem Transformador.	15
Figura 02. Circuito divisor de tensão equivalente.	15
Figura 03. Formas de onda da entrada e da saída da etapa AC.	16
Figura 04. Formas de onda da retificada sem e com o filtro.	17
Figura 05. Tensão na carga regulada pelo diodo zener.	17
Figura 06. Simulação do ensaio da fonte sem transformador.	21
Figura 07. Circuito de acionamento do LED IR.	23
Figura 08. Desenho técnico do TSOP38xxx.	25
Figura 09. Diagrama de blocos do TSOP38xxx.	26
Figura 10. Resposta em frequência do TSOP38xxx.	27
Figura 11. Sensibilidade do sensor a diferentes comprimentos de onda.	27
Figura 12. Diagramas de irradiação do receptor.	28
Figura 13. Detalhes do circuito receptor e transmissor.	29
Figura 14. Encapsulamento e símbolo do TRIAC.	30
Figura 15. Quadrantes de funcionamento do TRIAC.	30
Figura 16. Curva V/I, comportamento de ativação do TRIAC.	31
Figura 17. Vista superior do CI (acima) e diagrama elétrico (abaixo).	32
Figura 18. Circuito de interface entre o MCU e a saída AC com o TRIAC.	32
Figura 19. Diagrama de pinos do PIC16F628A.	34
Figura 20. Principais telas do KiCad (Imagens do site oficial).	36
Figura 21. Diagramas de circuito da plataforma de comunicação IR.	37
Figura 22. Layout da placa de circuito impresso.	38
Figura 23. Vista superior da placa.	40
Figura 24. Detalhe do MCU, TRIAC ao fundo e FST a direita.	40
Figura 25. Detalhe da Placa montada sobre o tripé de PVC.	41
Figura 26. Diagrama temporal do pacote do protocolo NEC.	43
Figura 27. Codificação dos bits 1 e 0. Detalhe para o pulso modula em 38 kHz.	43
Figura 28. Formato modificado do pacote.	44
Figura 29. Topologia radicular dos caminhos roteados.	51
Figura 30. Diagrama temporal do protocolo de roteamento.	54
Figura 31. Esquema de ligação entre os módulos IR com PLC	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 01. Lista de custo dos materiais de uma placa.	39
Tabela 02. Valores de configuração do CCP.	46
Tabela 03. Lista de comandos do protocolo de roteamento.	53

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACK	Acknowledge (reconhecimento)
AGC	Automatic Gain Control (Controle Automático de Ganho)
AODV	Ad hoc On-Demand Distance Vector
CIR	Consumer infrared
CPU	Central Processing Unit
CRC	Cyclic Redundance Check (Verificação por Redundância Cíclica)
FST	Fonte Sem Transformador
GF(2)	Campo de Galois de Dois Elementos
GPIO	General Port Input Output
IR	InfraRed (Infravermelho)
LED	Light Emitting Diode (Diodo Emissor de Luz)
LKC	Lei de kirchhoff das Correntes
LUT	Look Up Table (Tabela de consulta)
MCU	Microcontrolador
NIR	Near InfraRed (Infravermelho Próximo)
PC	Personal Computer
PCI	Placa de circuito Impresso
PPM	Pulse Position Modulation
PWM	Pulse Width Modulation (Modulação por largura de pulso)
RAM	Random Access Memory
RISC	Reduced Instruction Set Computer
ROM	Read Only Memory (Memória Somente de Leitura)

SUMÁRIO

1. Introdução	12
2. Descrição de Hardware	14
2.1. Fonte sem Transformador	14
2.2. Comunicação por Infravermelho	22
2.2.1. Camada Física de Transmissão	23
2.2.2. Camada Física de Recepção	25
2.3. Atuador de Estado Sólido com TRIAC	29
2.4. Microcontrolador PIC16F628A	33
2.5. Design e Prototipagem	35
3. Descrição de Software	42
3.1. Protocolo de Transporte	42
3.1.1. Protocolo NEC Original	42
3.1.2. Protocolo NEC Modificado	44
3.2. Modulação em Software	45
3.3. Algoritmo de Detecção de Erros - CRC	47
3.4. Protocolo de Rede	49
3.4.1. Funcionamento da Rotina de Roteamento	52
4. Resultados	55
5. Trabalhos Futuros	57
6. Referências	58

1. INTRODUÇÃO

As redes Ad hoc são muito importantes no contexto atual de telecomunicações e telemetria. Este tipo de rede é aplicável a diversas situações como a agricultura, pecuária, indústria e o uso doméstico. A diversidade de aplicações das redes Ad hoc deve-se ao seu caráter distribuído, que não necessita de uma estrutura prévia para que a mesma seja implementada. Desta forma, é da constituição das redes Ad hoc uma natureza dinâmica que trás muitos benefícios para a integração de sistemas embarcados que necessitam de uma forma de intercomunicação, como a Internet das Coisas.[1][3]

Dentro do ambiente acadêmico o estudo deste tipo de rede é feito, normalmente, de forma virtual dentro de emuladores. O uso de emuladores permite o uso de uma grande quantidade de pontos de rede, o que permite o teste de técnicas de salto de pacotes, roteamento e outros, porém limita o ponto de vista prático e de problemas que por vezes não são contemplados dentro da simulação, mas que aparecem no mundo real. Além da facilidade e versatilidade encontrada nas simulações o preço das plataformas comerciais de rede ad hoc afasta os interessados em realizar atividades práticas. A plataforma ZigBee, uma das mais conhecidas, foi cotado no ano deste trabalho em valores em torno de R\$150,00.

Uma das causas do preço elevado das plataformas comerciais é o excesso de recursos, que por vezes não são utilizados. Isso impede que esta tecnologia seja mais estudada no meio acadêmico, e utilizada numa realidade onde os recursos dos consumidores para investimento em inovação não é elevado, o que ocasiona, por exemplo, a falta de tecnologia nos processos agrícolas desta região do país.

Uma plataforma com recursos mais limitados e menor custo de fabricação, mas que ofereça os recursos básicos para montagem e manutenção de uma rede possui uma grande aplicabilidade em áreas, desta região, que hoje possuem pouco ou quase nenhuma inovação tecnológica.

A proposta deste trabalho é a criação de uma plataforma básica de rede de fácil entendimento e baixo custo, que possua uma configuração de hardware e firmware capaz de suprir as necessidades para o ensino e pesquisa no ambiente acadêmico e pela população de produtores e consumidores com menor poder aquisitivo.

Dentro do trabalho a relação custo/benefício sempre foi um fator decisivo. O foco desta plataforma é a utilização de luz infravermelha para a transmissão de dados, porém o hardware possui a capacidade de ser facilmente modificado para a utilização de outros meios

de comunicação. A fonte de alimentação adotada para o circuito desenvolvido também foi pensado para ser de baixo custo e necessitar o mínimo possível de manutenção, porém a mesma pode ser facilmente substituída por outro tipo que atenda melhor as necessidades do usuário.

A etapa de processamento de dados e de comunicação foi embarcada dentro de um único chip, um microcontrolador de 8 bits de fácil aquisição e baixo custo. Isso simplifica o design e montagem do circuito final.

Os algoritmos de rede e de transmissão de dados foram pensados para ocupar o mínimo de memória do microcontrolador ao mesmo tempo em que mantêm a simplicidade de uso. Pois isso torna possível utilizar a plataforma com ou sem uma rede, aumentando ainda a versatilidade e o número de aplicações da mesma.

Com este contexto este trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de uma proposta de plataforma para comunicação sem fio, via *infrared* (IR), de baixo custo para uso com um protocolo de rede ad hoc simples.

Os objetivos específicos são:

- Desenvolvimento de um hardware com recursos mínimos para uso em rede ad hoc;
- O Hardware deve utilizar comunicação IR por questões de segurança e custo;
- A fonte de alimentação deve ser simples e de baixo custo;
- O hardware deve permitir interação com o ambiente;
- Integração do protocolo de transporte e de rede num microcontrolador (MCU) de baixo custo;
- Uso de um protocolo de transporte com capacidade suficiente para o funcionamento do protocolo de rede;
- Desenvolvimento de um protocolo de rede simples e prático, e que fornece o recurso de roteamento;
- Montagem e teste do protótipo.

2. DESCRIÇÃO DO HARDWARE

Esta seção contém a descrição detalhada do projeto das diversas partes que compõe o hardware da plataforma proposta. Encontra-se aqui a descrição do projeto da fonte de alimentação, dos canais de comunicação e do atuador. Também se encontra a descrição da prototipagem da placa de circuito.

2.1. FONTE SEM TRANSFORMADOR

Assim como qualquer circuito eletrônico a plataforma desenvolvida neste trabalho necessita de uma fonte de alimentação. Existem várias formas de se prover energia nos níveis adequados para circuitos de baixa potência podendo ser citadas as baterias, as fontes com transformador e as fontes chaveadas, entretanto optou-se por utilizar outro tipo de fonte neste trabalho, a fonte sem transformador.[2]

Antes de mostrar o modelamento e dimensionamento da fonte sem transformador é feita uma análise que justifique seu uso. Dois dos objetivos deste trabalho foram postos em foco durante a escolha da fonte de alimentação, o baixo custo e a facilidade de montagem do circuito. Desta forma, embora as fontes chaveadas sejam muito eficientes e pequenas as mesmas são caras e complexas em seu projeto e montagem, pois é preciso dimensionar e construir um de seus elementos mais críticos, o indutor acoplado. As fontes com transformador são uma excelente opção no que diz respeito à quantidade de energia disponível e também possibilitam o isolamento do circuito eletrônico e do circuito da rede elétrica, porém os transformadores de baixa frequência são grandes e caros. As baterias são práticas nos quesitos, tensão regulada e portabilidade, pois é comum encontrar modelos na faixa de tensão ideal para esse tipo de aplicação, os modelos de íon de lítio possuem densidade de carga grande o suficiente para prover uma boa autonomia para sistemas sem cargas pesadas como motores. Entretanto as baterias precisam ser trocadas por causa da descarga ou fim da sua vida útil, e os modelos recarregáveis precisam de circuitos carregadores para continuar funcionando.

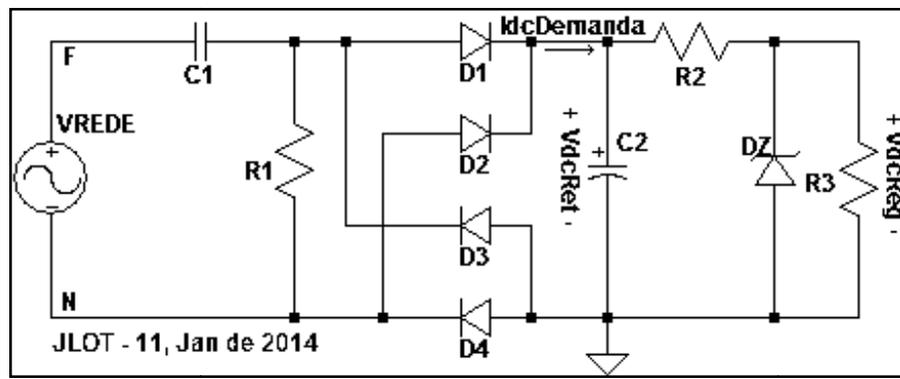
As fontes sem transformadores (FST) são baratas e ocupam pouco espaço, pois são basicamente um divisor de tensão que utiliza um capacitor para limitar a corrente fornecida ao circuito, em contra partida as mesmas não conseguem fornecer uma grande quantidade de energia e não são isoladas eletricamente da rede força. Esse tipo de fonte de

alimentação é indicada para uso em circuitos de baixa potência e que não entrem em contato direto com pessoas ou animais.[2]

O modelamento da fonte sem transformador não é linear, pois existem elementos como diodos retificadores e um diodo zener. Porém existem aproximações que permitem o dimensionamento de seus componentes de maneira simples.

O circuito completo da fonte sem transformador pode ser visto na Figura 01. O passo a passo do projeto deste circuito é visto logo em seguida.

Figura 01–Circuito da Fonte sem transformador.

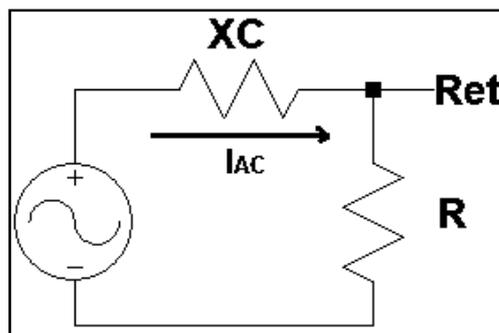


Fonte: Autor.

O funcionamento deste circuito é bastante simples de ser entendido e envolve poucos conceitos de eletrônica e matemática.

O ponto chave deste circuito é a utilização do capacitor $C1$ como uma reatância limitadora de corrente, pois isso evita a produção de calor que aconteceria se fosse utilizado um resistor em seu lugar. A Figura 02 mostra o capacitor trabalhando como limitador de corrente.

Figura 02 – Circuito divisor de tensão equivalente.

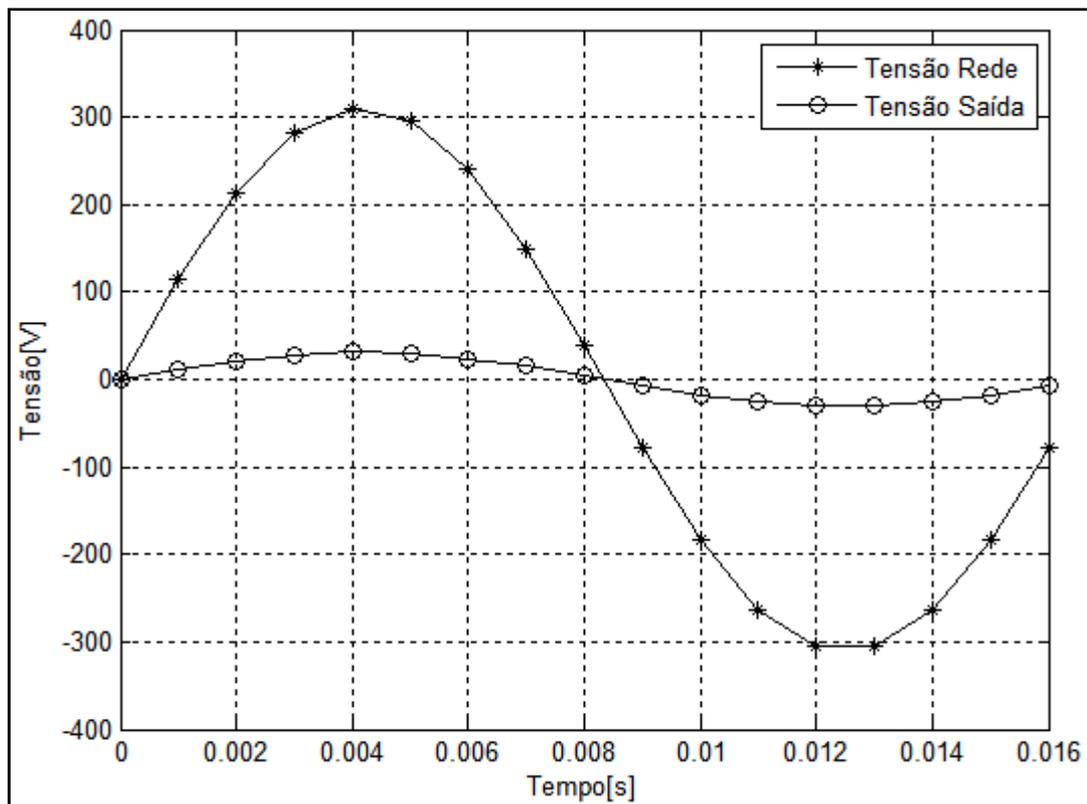


Fonte: Autor.

Como foi dito a corrente I_{AC} pode ser facilmente calculada através da Lei de Ohm.

O Resistor R1 serve para limitar a tensão aplicada ao retificador a diodos (ponte de diodos). O resistor R1 limita a tensão de entrada da ponte retificadora, pois parte da corrente de entrada passa por ele, e de acordo com a Lei de Ohm surge sobre o resistor uma tensão proporcional ($V = R \cdot I$) ao mesmo, o resistor R1 é muito importante na proteção do circuito alimentado por esta fonte, pois o mesmo garante um menor estresse elétrico ao resto do circuito de retificação e regulação. A Figura 03 mostra a relação entre a tensão da rede e a tensão de saída que está sobre o resistor R1.

Figura 03 – Formas de onda da entrada e de saída da etapa AC ($V \times T$).

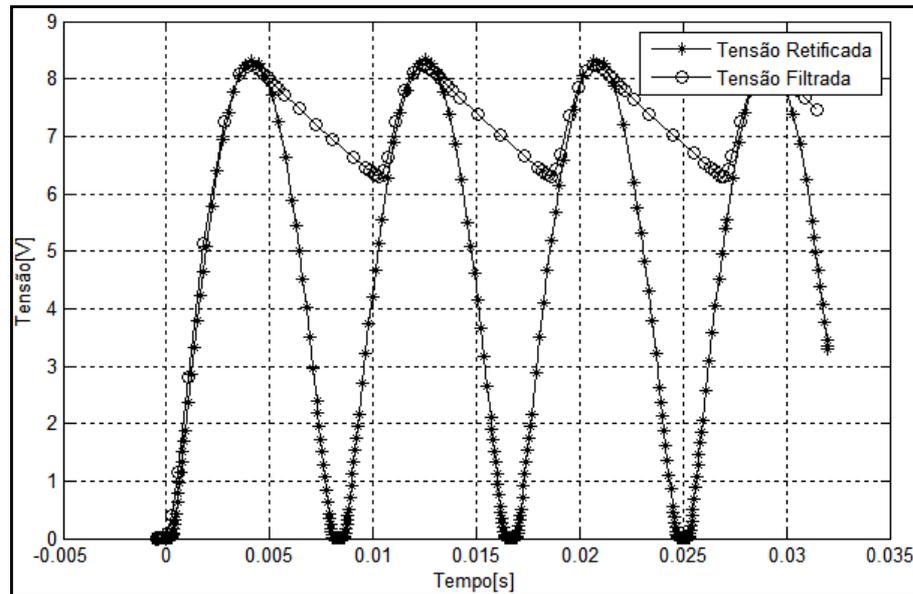


Fonte: Autor.

A ponte retificadora a diodos é um arranjo semiconductor que converte a tensão alternada em contínua. Os diodos utilizados aqui não precisam ser do tipo rápido, pois, a frequência de oscilação da tensão da rede é baixa.

O capacitor C2 é um filtro e serve para remover as oscilações da tensão na saída do retificador. A Figura 04 mostra a saída do retificador sem e com o capacitor de filtro.

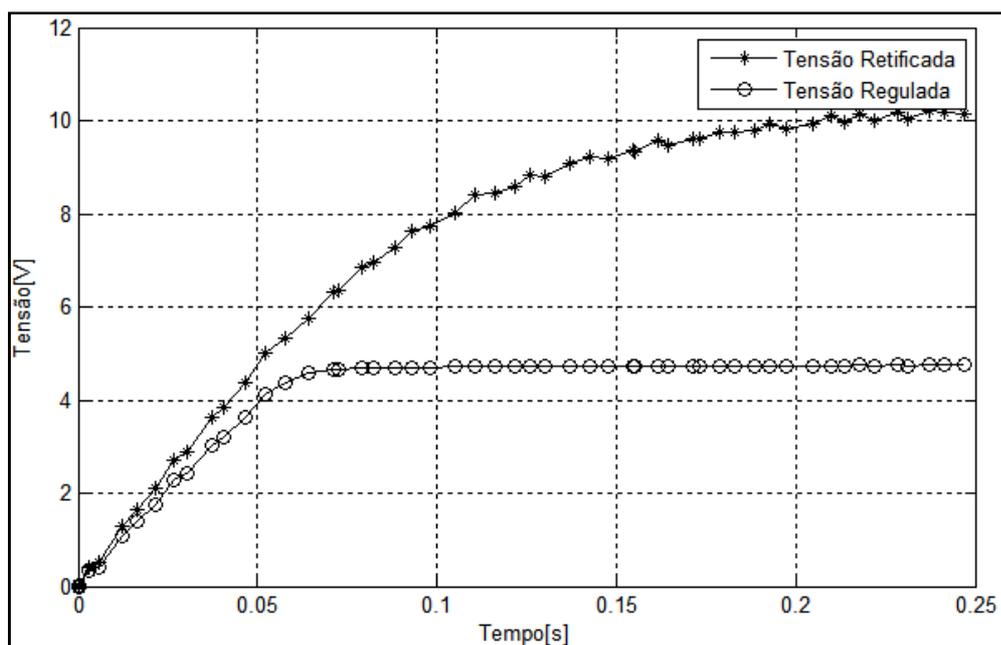
Figura 04 – Formas de onda da tensão retificada sem e com capacitor filtro.



Fonte: Autor.

Por fim o resistor R2 e o diodo zener DZ servem como reguladores de tensão. Desta forma a tensão de saída regulada sobre a carga (R3) é aproximadamente constante e igual à tensão de ruptura do diodo zener, a Figura 05 mostra isso.

Figura 05 – Tensão na carga regulada pelo diodo zener.



Fonte: Autor.

O projeto de uma fonte sem transformador segue passos bem determinados, e se forem fixadas algumas informações sobre o projeto, a matemática necessária para os cálculos é bastante simplificada. Nesta análise é suposto que o projetista selecione os seguintes fatores:

- V_{REDE} (Tensão da rede) [V];
- $FREQ$ (Frequência da rede) [Hz];
- V_{DCRet} (Tensão CC retificada) [V];
- V_{DCReg} (Tensão CC regulada pelo diodo zener) [V];
- Var_{VDCRet} (Ripple da tensão retificada) [V];
- $I_{DCDemand}$ (Corrente DC de demandada pelo circuito CC) [A].

O primeiro componente a ser dimensionado é o capacitor C1, que limita a corrente AC de entrada. Existem dois fatores que precisam ser determinados no dimensionamento de C1, o primeiro é a tensão de trabalho, que é a máxima tensão suportada pelo capacitor. Como a rede elétrica no Brasil é regulamentada em $220V_{RMS}$ (331Vp) ou $110V_{RMS}$ (156Vp) existem apenas dois valores comerciais para se escolher, 400V para a rede de $220V_{RMS}$ e 250V para a rede de $110V_{RMS}$. O segundo fator é a capacitância deste capacitor, para realizar esse cálculo é preciso saber qual a capacidade de corrente que é fornecida pela rede através de um capacitor de 1uF. O cálculo da capacidade de corrente do capacitor é dado pela seguinte expressão:

$$\text{Eq. 01} \quad CapI_{RMS} = V_{REDE} * 2\pi * Freq * 1\mu \quad [A/uF]$$

É necessário calcular também a corrente mínima de entrada no retificador, isso é feito através do cálculo do valor RMS da corrente de demanda. É importante deixar claro que essa corrente de demanda deve ser escolhida com um valor bem acima daquele consumido pela carga, pois, esta corrente de demanda será dividida entre o capacitor C2 e o diodo DZ também. Desta forma o valor da corrente mínima de entrada do retificador é dado pela equação 02.

$$\text{Eq. 02} \quad I_{minRet} = \frac{I_{DCDemand}}{\sqrt{2}} \quad [A]$$

Com os valores calculados com as eq.01 e eq.02 é possível calcular o valor limite de C1.

$$\text{Eq. 03} \quad C1_{\text{mín}} = \frac{I_{\text{mínRet}}}{\text{Cap}I_{\text{RMS}}} \quad [\text{uF}]$$

Na prática deve ser escolhido um valor de C1 em torno de duas vezes $C1_{\text{mín}}$, pois isto deve garantir a corrente necessária para o correto funcionamento do circuito.

O cálculo de R1 é mais simples que o de C1, pois se trata da aplicação direta da Lei de Ohm. A tensão CC na saída do retificador é estipulada em V_{DCRet} , logo, o valor da tensão na entrada do retificador, que é a mesma tensão sobre R1, pode ser calculado pela eq. 04.

$$\text{Eq. 04} \quad V_{R1} = \frac{(V_{\text{DCRet}} + 1,4)}{\sqrt{2}} \quad [\text{V}]$$

Para aplicar a Lei de Ohm e calcular a resistência de R1 é necessário conhecer a corrente que circula por R1. A corrente I_{R1} pode ser calculada pela eq. 05.

$$\text{Eq. 05} \quad I_{R1} = I_{C1} - I_{\text{Ret}} = (220 * 2\pi * \text{Freq} * C1) - \left(\frac{I_{\text{DCDemand}}}{\sqrt{2}} \right) \quad [\text{A}]$$

Vale notar que I_{R1} é o valor RMS da corrente alternada e que C1 é dado em farads. Vale notar também que C1 é o valor comercial para C1 escolhido no primeiro passo do projeto. Desta forma $R1 = V_{R1}/I_{R1}$.

Os diodos D1, D2, D3 e D4, são diodos retificadores de baixa velocidade. O valor crítico para a escolha destes componentes é a máxima tensão reversa que os mesmos suportam. Os modelos 1N4004 ao 1N4007 servem tanto para as redes de 220V e de 110V.

O capacitor C2, assim como o capacitor C1, precisa que os valores de tensão de trabalho e de capacitância sejam determinados. A sua tensão de trabalho pode ser determinada pelo valor de V_{DCRet} que é o único limitante para esse valor, logo uma tensão de trabalho que seja maior que V_{DCRet} deve ser escolhida. A capacitância de C2 é dada pela equação de filtro de um retificador de onda completa (eq. 06).

$$\text{Eq. 06} \quad C2 = \frac{I_{\text{DCDemand}}}{2 * \text{Freq} * \text{Var}V_{\text{DCRet}}} * 10^6 \quad [\text{uF}]$$

O valor comercial deste capacitor deve ser tomado próximo ao valor calculado, pois este valor é importante por suas propriedades de filtragem.

O valor de R2 é calculado pela Lei de Ohm, assim como R1. A tensão sobre este componente é a diferença entre V_{DCRet} e V_{DCReg} . Logo, R2 é calculado por eq. 07.

$$\text{Eq. 07} \quad R2 = \frac{V_{DCRet} - V_{DCReg}}{I_{R2}} \quad [\text{ohm}]$$

Por comodidade adota-se $I_{R2} \approx I_{DCDemand}$, isso facilita o cálculo.

E por fim o valor de DZ, o diodo zener pode ser escolhido de forma direta de acordo com a tensão de saída.

Para o circuito do modulo de comunicação sem fio foi escolhido os seguintes parâmetros de projeto:

- $V_{REDE} = 220 V_{RMS}$;
- $FREQ = 60 \text{ Hz}$;
- $V_{DCRet} = 10 \text{ V}$;
- $V_{DCReg} = 4,7 \text{ V}$;
- $Var_{VDCRet} = 0,5 \text{ V}$;
- $I_{DCDemand} = 95 \text{ mA}$.

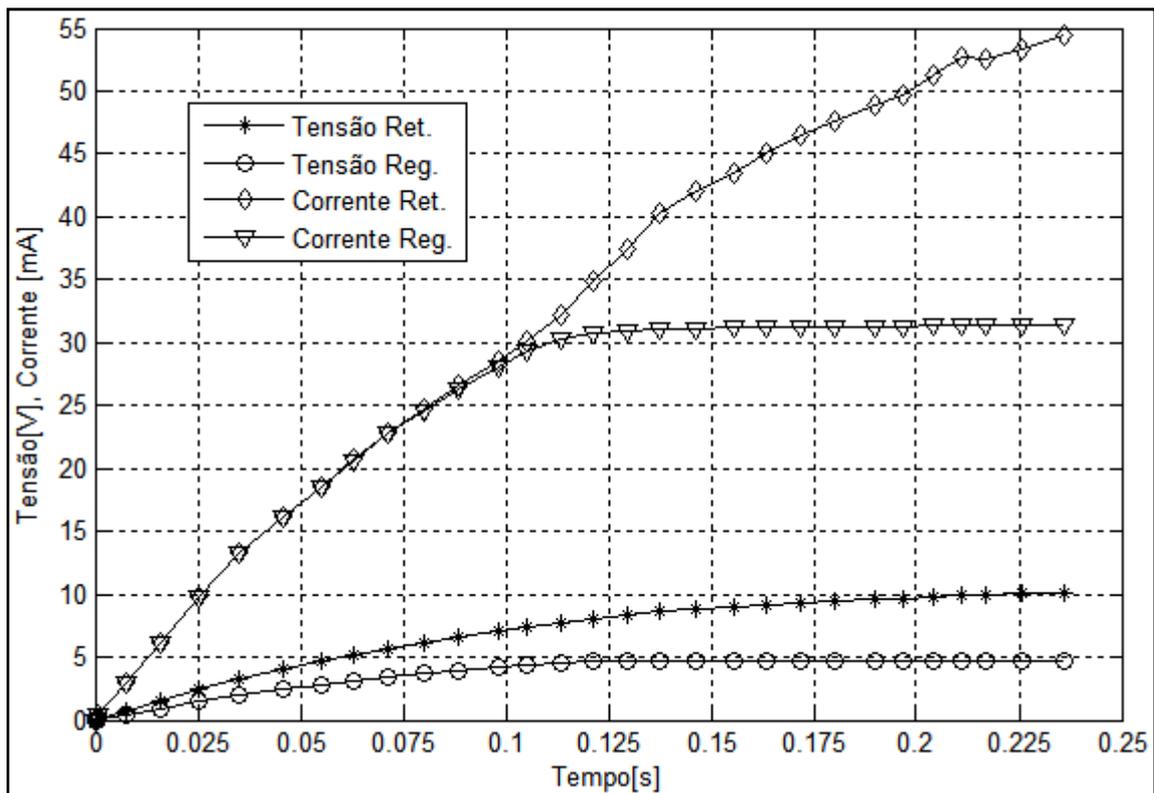
Aqui são válidos alguns comentários a respeito dos valores dos parâmetros de projeto. A tensão e frequência da rede são fixas, dentro de uma faixa aceitável, para esta região do país, pois é requisito do Operador Nacional do Sistema. A tensão retificada foi escolhida como 10 Volts, pois isso servirá para alimentar uma parte do circuito que precisa de mais potência do que a fornecida pela etapa de tensão regulada. A tensão regulada foi escolhida como 4.7 Volts, pois além de ser um nível de tensão que o microcontrolador aceita a mesma é um valor comercial para o diodo zener. A variação da tensão retifica foi escolhida como 0,5 Volts, pois a etapa do circuito conectada a esta tensão não é sensível a este nível de variação e isso ajuda a reduzir o tamanho do capacitor de filtro. Por fim, a corrente de demanda do circuito requer uma a tensão especial, pois esta corrente deve ser escolhida com um valor bem acima do que aquela fornecida ao circuito principal, pois existem perdas de corrente no resistor R1 e no capacitor C2. Estimou-se um consumo de corrente em torno de 50 mA para o circuito microcontrolado, logo utilizou-se uma corrente de demanda um pouco menor que o dobro.

Após aplicar os valores escolhidos nas equações desenvolvidas acima e ajustar os resultados para valores comerciais os componentes ficaram dimensionados da seguinte maneira:

- C1 = 1 μ F @ 400V;
- R1 = 680 ohm @ 500mW;
- C2 = 680 μ F @ 16V;
- R2 = 100 ohm @ 500mW;
- DZ = 4,7V @ 500mW;
- D1...D4 = 1N4007.

A Figura 06 mostra a simulação feita no software LTSpice para o ensaio do circuito da fonte sem transformador nas condições citadas acima.

Figura 06 – Simulação do ensaio da fonte sem transformador.



Fonte: Autor.

2.2. COMUNICAÇÃO POR INFRAVERMELHO

Como um meio de curto alcance, de comunicação interna, a radiação infravermelha oferece várias vantagens significativas sobre rádio. Emissores e detectores infravermelhos capazes de operação de alta velocidade estão disponíveis a baixo custo. A região espectral do infravermelho oferece uma largura de banda virtualmente ilimitada que está regulamentada a nível mundial. A luz infravermelha e a luz visível são próximas quanto ao comprimento de onda, e elas exibem um comportamento qualitativamente semelhante. Ambos são absorvidos por objetos escuros, difusamente refletidos por objetos de cor clara, e direcionalmente refletida de superfícies brilhantes. Ambos os tipos de luz podem penetrar através do vidro, mas não através de paredes ou outras barreiras opacas, desta forma que as transmissões de infravermelho ficam confinadas ao ambiente de origem se este for fechado. Este fator de confinamento facilita a proteção da rede contra invasores externos, e impede a interferência entre os elos que operam em diferentes quartos.[1][7]

Assim como os outros tipos de comunicação sem fio, a comunicação por infravermelho começa com a modulação de uma onda portadora. Isso garante vantagens como a imunidade contra ruídos oriundos de outras fontes emissoras e a divisão de faixas dentro da largura de banda total da onda utilizada.

O infravermelho possui duas características que são favoráveis quanto a segurança, mas que limitam a difusão de informação. Tais características são a propagação em linha reta e incapacidade de atravessar paredes. Neste trabalho é necessário que cada módulo consiga transmitir e receber informações em mais de uma direção, desta forma é necessário utilizar uma forma simples e de baixo custo para a modulação e a demodulação do sinal.

O solução foi utilizar algo que já se encontra no mercado a décadas e tem funcionado muito bem em todos esses anos, o padrão *Consumer Infrared* (CIR). O padrão CIR utiliza *Light Emitting Diode* (LEDs) infravermelho e receptores de encapsulamento único comuns. Os LEDs infravermelho são exatamente o que o nome diz diodos emissores de luz no comprimento do infravermelho próximo, seu acionamento é feito através de uma corrente constante acima de um limite mínimo, assim como os LEDs normais. Os receptores infravermelho de encapsulamento único são circuitos integrados optoeletrônicos. Tais receptores possuem toda a etapa óptica, lente e transdutor, e etapa eletrônica, filtro passa-faixa e amplificador, necessária para realizar a recepção e demodulação do sinal infravermelho sem maiores complicações.[1]

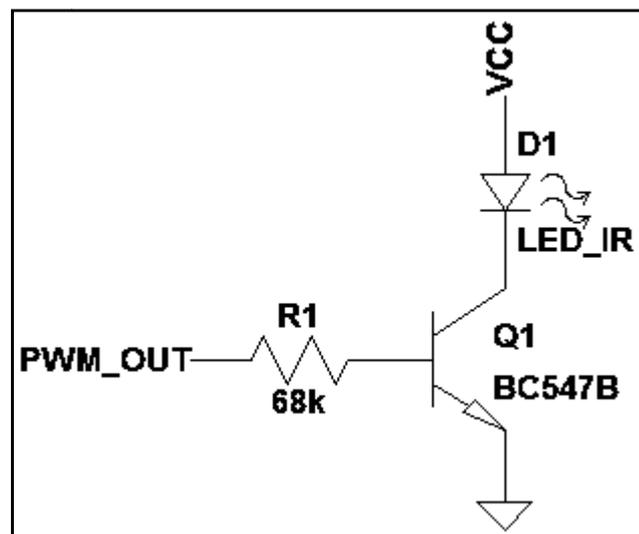
Assim como o LED este receptor de encapsulamento único é de fácil aquisição e de baixo custo. Porém, este tipo de receptor não utiliza a frequência do infravermelho como frequência da onda portadora. Isso é feito por causa da grande quantidade de fontes de infravermelho existentes. Estes receptores recebem infravermelho no comprimento de onda em torno de 950nm, ou seja, dentro da categoria *Near Infrared* NIR/IR-A, mas só amplificam os sinais que estejam modulados numa determinada frequência. As frequências mais comuns nos modelos comerciais são 37kHz, 38kHz, 40kHz e 56kHz, embora esta última seja difícil de encontrar hoje em dia.

2.2.1. CAMADA FÍSICA DE TRANSMISSÃO

A frequência de modulação é gerada através da saída de *Pulse With Modulation* (PWM) do microcontrolador. Este pino é ligado através de resistências elétricas a transistores que chaveiam os LEDs IR com a corrente necessária para seu funcionamento correto.

A etapa de transmissão é constituída de três circuitos iguais de acionamento de LED IR, A Figura 07 mostra o circuito.

Figura 07 – Circuito de acionamento do LED IR.



Fonte: Autor.

Como qualquer diodo o LED precisa ser polarizado diretamente com uma tensão superior a certo valor para que o mesmo venha a funcionar. A tensão de barreira do LED IR utilizado é em torno de 2.3 Volts. O potencial VCC indicado na Figura 07 é igual a 10,3 Volts

em relação ao terra. Quando o transistor entrar em condução a tensão sobre o LED será em torno de 9.6 Volts, mais do que o suficiente para acionar o LED. A corrente fornecida ao LED deve ser mantida baixa, para evitar sobre aquecer o mesmo, o valor comum para a corrente de alimentação do LED é em torno de 20 mA. A tensão de saída do PWM possui amplitude de 4.7 Volts fornecida pelo microcontrolador e o ganho H_{FE} do transistor utilizado, um BC548/547B, é em torno de 300. Para calcular o valor da resistência de R1 no circuito acima basta aplicar a Lei de Ohm e a Lei de Kirchoff das Correntes (LKC) aplicada ao transistor.

$$I_{LED} = 20mA = I_C = H_{FE} * I_B = 300 * I_B$$

$$I_B = \frac{20 mA}{300} = 0.06667 mA$$

$$I_B = 0.0667 mA = \frac{4.7 - 0.7}{R1}$$

$$R1 = \frac{4}{0.0667 mA} = 60 kOhm$$

Adota-se um valor comercial superior a 60 kOhm e re calculam-se os valores de corrente.

$$I_B = \frac{4.7 - 0.7}{68000} = 0.05882 mA$$

$$I_{LED} = I_C = 300 * 0.05882 = 17.65 mA$$

Como o valor da corrente fornecida ao LED com o resistor de base igual 68 kOhm está dentro do aceitável este valor pode ser utilizado.

Adotando-se uma eficácia luminosa em torno de 25% para o LED IR comum, é possível calcular a potência luminosa que o mesmo emite.

$$P_{LUM} = 0.25 * 17.65 * (10.3 - 0.7) = 42.36 mW$$

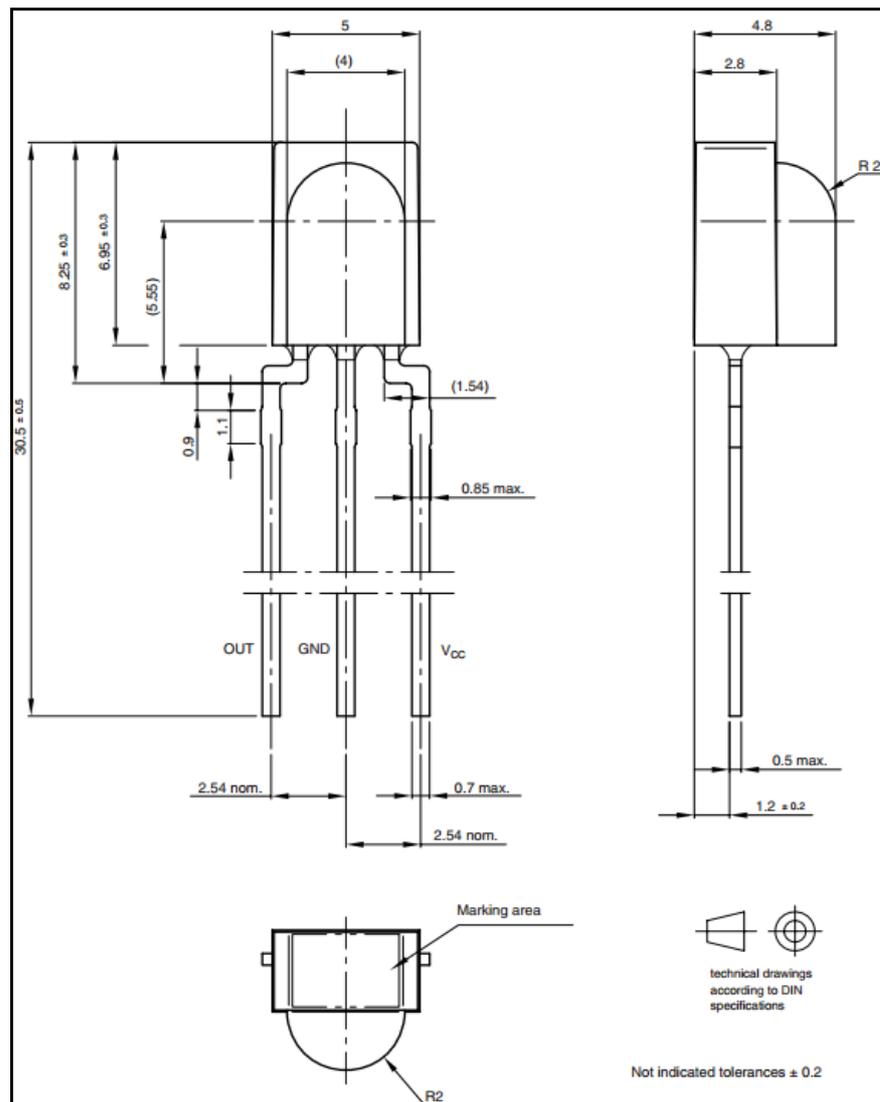
Como existem três LEDs emitindo luz ao mesmo tempo, a potência total de transmissão é 127.08 mW. Distribuído de maneira quase uniforme numa abertura de 270°

2.2.2. CAMADA FÍSICA DE RECEPÇÃO

A etapa de recepção de dados é feita através de um componente chamado receptor de encapsulamento único. Este componente contém todo o hardware necessário para a recepção, filtragem e demodulação do sinal IR. O modelo utilizado neste projeto é o TSOP38238, este modelo é de baixo custo e fácil aquisição.[12]

A proteção de epóxi do CI serve como lente convergente e como filtro IR, isso aumenta a eficácia e a imunidade a ruídos do componente. O TSOP38xxx é compatível com todos os protocolos CIR. A Figura 08 mostra o desenho técnico do TSOP38xxx.

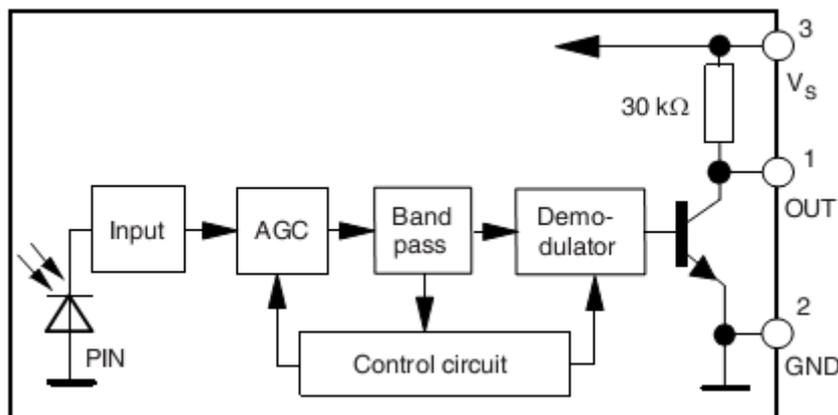
Figura 08 – Desenho técnico do TSOP38xxx, todas as dimensões estão em milímetros.



Fonte: Folha técnica do componente [12].

O TSOP382xx possui três pinos, dois para alimentação e uma saída digital. Sua tensão de alimentação pode ser no mínimo 2.5 Volts DC e no máximo 5.5 Volts DC com um consumo de apenas 10 mW, sua saída digital é feita através de um coletor aberto com resistência de pull-up em torno de 30 a 40 kOhm. O TSOP38xxx possui vários blocos internos que o fazem uma solução pronta para uso em sistemas embarcados. A Figura 09 mostra o diagrama lógico do componente.[12]

Figura 09 – Diagrama de blocos do TSOP38xxx.

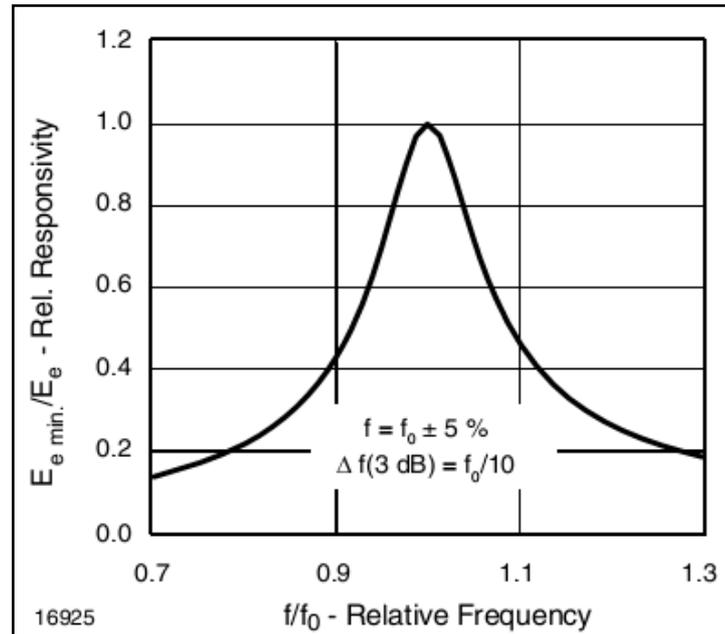


Fonte: Folha técnica do componente [12].

O transdutor de entrada é um foto diodo, este fica posicionado atrás da lente convergente de epóxi. Um buffer de entrada entrega o sinal para o *Automatic Gain Control* (AGC). O AGC permite que o sinal passe para os estágios seguintes com o nível de intensidade ideal, ou seja, amplifica mais um sinal fraco e menos um sinal forte. O filtro passa-faixa seleciona apenas o sinal em torno da frequência de modulação, que neste caso é 38 kHz. Depois de pré-amplificado e devidamente filtrado, o sinal passa para o demodulador, este pode ser visto como um detector de envelope. Todos os estágios são devidamente controlados por um circuito dedicado. O sinal demodulado é utilizado para chavear o transistor de saída.[12]

A resposta em frequência do receptor é uma característica muito importante, pois mostra a imunidade do mesmo contra outras fontes de luz infravermelho. A Figura 10 mostra o gráfico do comportamento da resposta em frequência. F_0 é a frequência de modulação do sinal, neste caso 38 kHz.

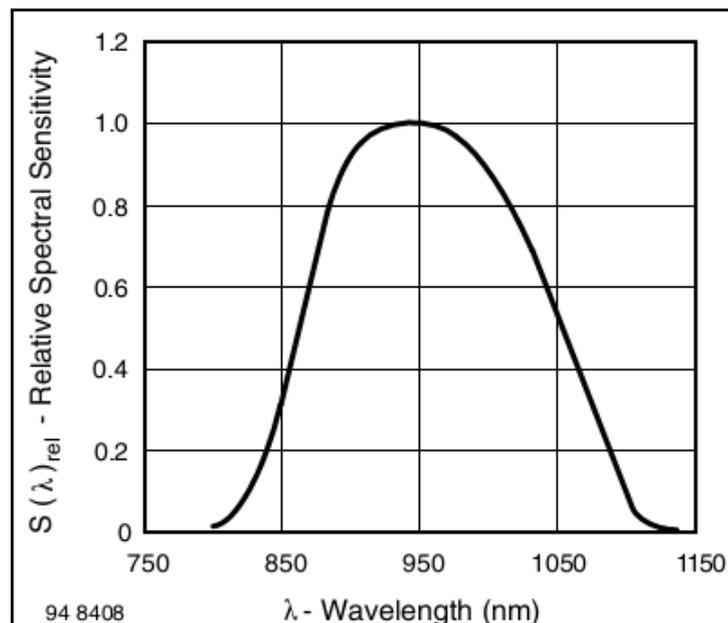
Figura 10 – Resposta em frequência do TSOP38xxx.



Fonte: Folha técnica do componente [12].

Além da resposta em frequência em relação a frequência de modulação também é importante conhecer a sensibilidade do sensor em relação ao comprimento de onda da luz. A Figura 11 mostra o gráfico da sensibilidade do sensor.

Figura 11 – Sensibilidade do sensor a diferentes comprimentos de onda.

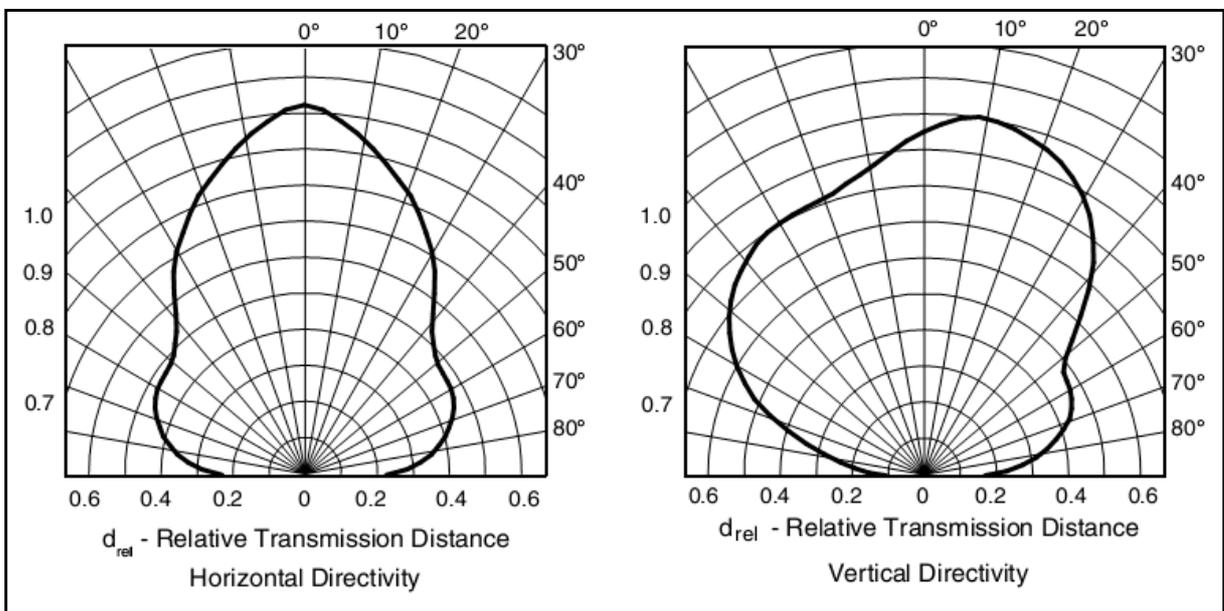


Fonte: Folha técnica do componente [12].

De acordo com o gráfico da Figura 11 a sensibilidade máxima do sensor ocorre em torno de 950 nm, que está dentro da região do espectro conhecida com infravermelho próximo ou NIR.

Outra informação gráfica importante retirada da folha técnica do componente é o diagrama de irradiação. Este diagrama mostra a sensibilidade do circuito à radiação em diferentes distâncias e orientações do receptor. A Figura 12 mostra estes diagramas para o componente em questão.

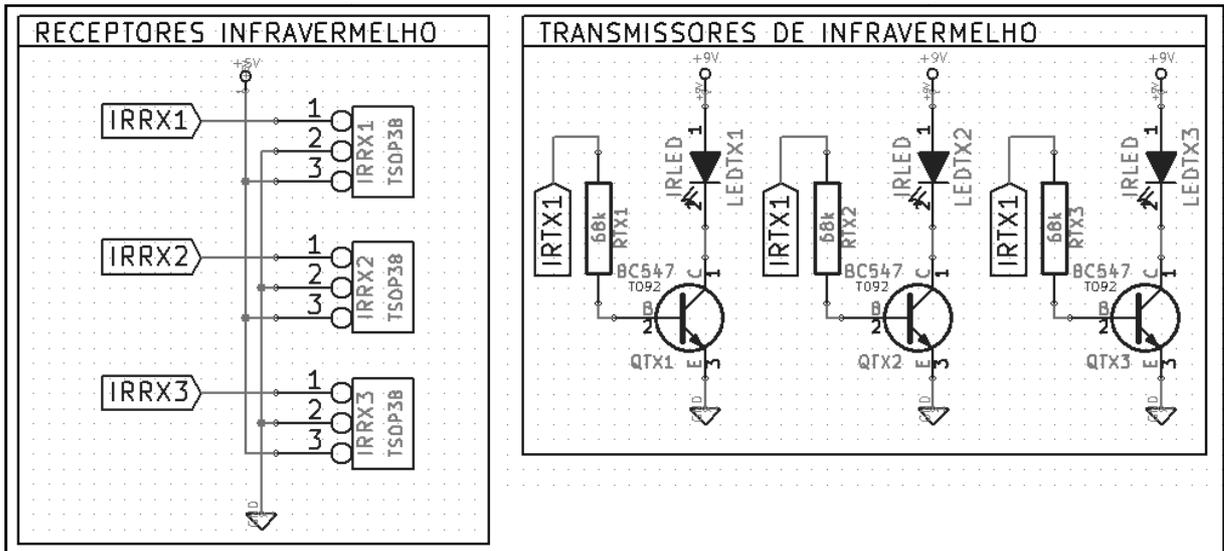
Figura 12 – Diagramas de irradiação do receptor. Plano horizontal a esquerda e vertical a direita.



Fonte: Folha técnica do componente [12].

Observando-se os diagramas da Figura 12 percebe-se que o componente foi projetado para ter sua maior sensibilidade no ponto inferior a frente da face frontal do mesmo. Isso seria um problema caso a plataforma que foi desenvolvida com apenas um sensor para recepção do sinal de dados. Porém, a placa foi projetada com três sensores espaçados a 90° um do outro, isso garante uma a intercessão das zonas de menor ganho, garantindo uma melhor cobertura do sinal irradiado de diferentes direções.

Figura 13 – Detalhes do esquemático receptor (a esquerda) e transmissor (a direita).



Fonte: Autor.

A Figura 13 mostra o diagrama do circuito de recepção e transmissão feitos no software KiCad. Estes circuitos foram utilizados para gerar o layout do circuito no mesmo software.

2.3. ATUADOR DE ESTADO SÓLIDO COM TRIAC

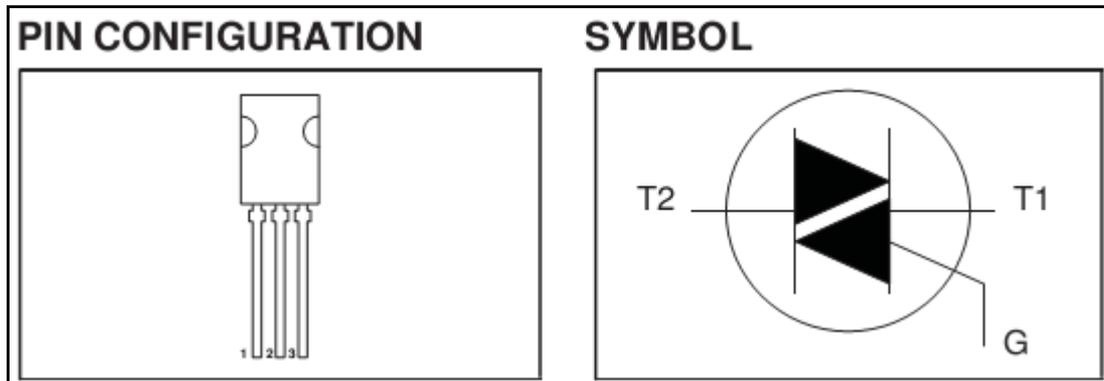
Um dos objetivos do projeto desta plataforma sem fio é o uso em automação residencial. Foi incluída no projeto da placa uma saída de 220VAC controlada.

Inicialmente foi analisado o uso de um relé para chavear os 220VAC na saída, porém um relé eletromecânico ocupa um espaço relativamente grande e consome uma alta corrente, quando comparado com a capacidade de corrente fornecida pela fonte sem transformador.

É necessário um componente capaz de conduzir corrente elétrica em ambos os sentidos e que possa suportar a tensão de pico da rede elétrica, no caso do Nordeste $220\sqrt{2}$ Volts. O componente que atende todas estas características é o TRIAC.

O TRIAC, triodo para corrente alternada, é um componente semicondutor equivalente a dois tiristores ligados em antiparalelo. Para que o TRIAC comece a conduzir é necessário aplicar ou drenar corrente elétrica do terminal GATE. O valor mínimo da corrente de ativação é tabelado na folha de dados como I_{GT} . Assim como outros tiristores o TRIAC possui apenas a ativação controlada, o mesmo só desliga quando a corrente que passa por seus terminais principais vai a zero. A Figura 14 mostra o símbolo eletrônico do TRIAC.[9]

Figura 14 – A esquerda um encapsulamento típico aos TRIACs (SOT82), a esquerda o símbolo eletrônico do TRIAC.

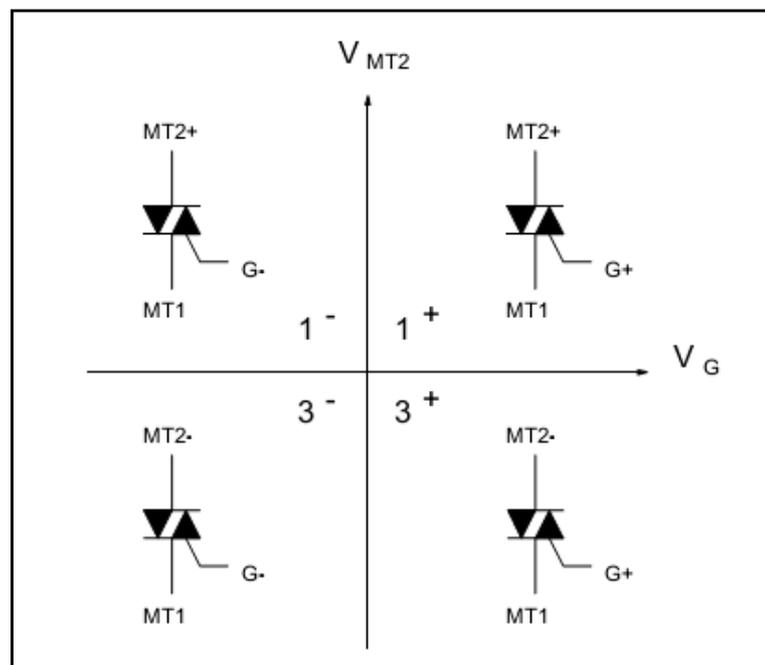


Fonte: Folha técnica do componente [14].

O potencial de referência para a tensão elétrica no GATE é o terminal T1, normalmente um resistor entre T2 e G é suficiente para ativar a condução do TRIAC.

O modo de operação do TRIAC é definido em quadrantes relacionados a tensão T2 e G em relação a T1. A Figura 15 mostra este gráfico.

Figura 15 – Quadrantes de funcionamento do TRIAC.

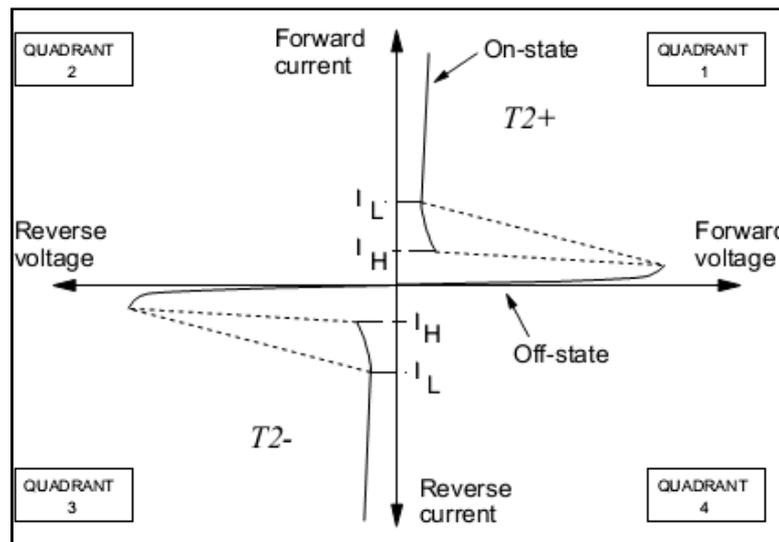


Fonte: *Application Note* [9].

Uma das recomendações quanto a ativação do TRIAC é que seu acionamento deve ser feito apenas nos quadrantes 1^+ e 3^- , pois estas duas configurações são simétricas entre si. Outra recomendação prática é que o quadrante 3^+ deve ser evitado.[9][13]

O comportamento de ativação do TRIAC nos quadrantes 1^+ e 3^- é mostrado na Figura 16.

Figura 16 – Curva V/I, comportamento de ativação do TRIAC.

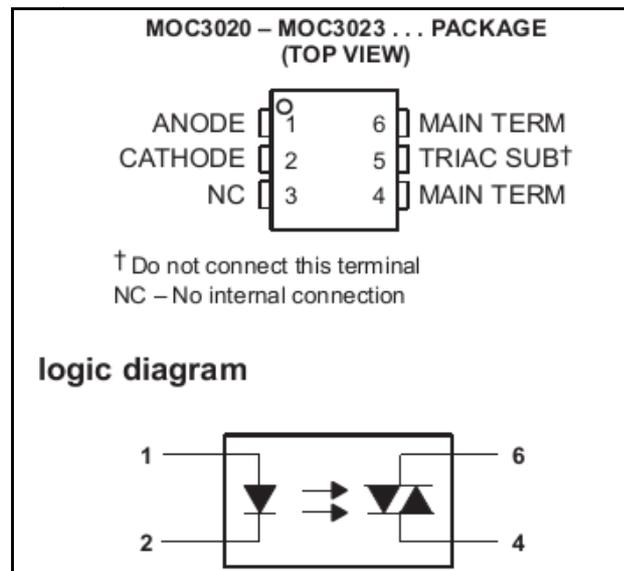


Fonte: *Application Note* [9].

De acordo com a Figura 16 quando o TRIAC está desativado a tensão V_T , tensão entre T1 e T2, pode variar tanto acima quanto abaixo de zero enquanto o TRIAC se comporta como um circuito aberto de alta impedância, curva *Off-state*. Quando o TRIAC é ativado, mediante uma corrente I_{GT} fornecida ou drenada do GATE dependendo do quadrante, a tensão V_T cai para um valor pequeno praticamente constante para uma grande faixa de corrente, curva *On-state*. Ainda de acordo com o gráfico da Figura 16 caso a corrente se aproxime muito de zero o TRIAC desliga. O componente utilizado no circuito é o BT134E da NXP Semiconductors.[9][13]

A integração entre o circuito AC de ativação do TRIAC e a saída digital do microcontrolador é feita através de um optoacoplador. O optoacoplador é um CI que contém um foto-TRIAC, TRIAC acionado por luz e um LED no mesmo encapsulamento. Ao acionar o LED o mesmo irradia sobre o foto-TRIAC ativando o mesmo. Quando o LED é desligado o foto-TRIAC desliga assim que sua corrente cai a zero. A Figura 17 mostra o diagrama lógico do optoacoplador.

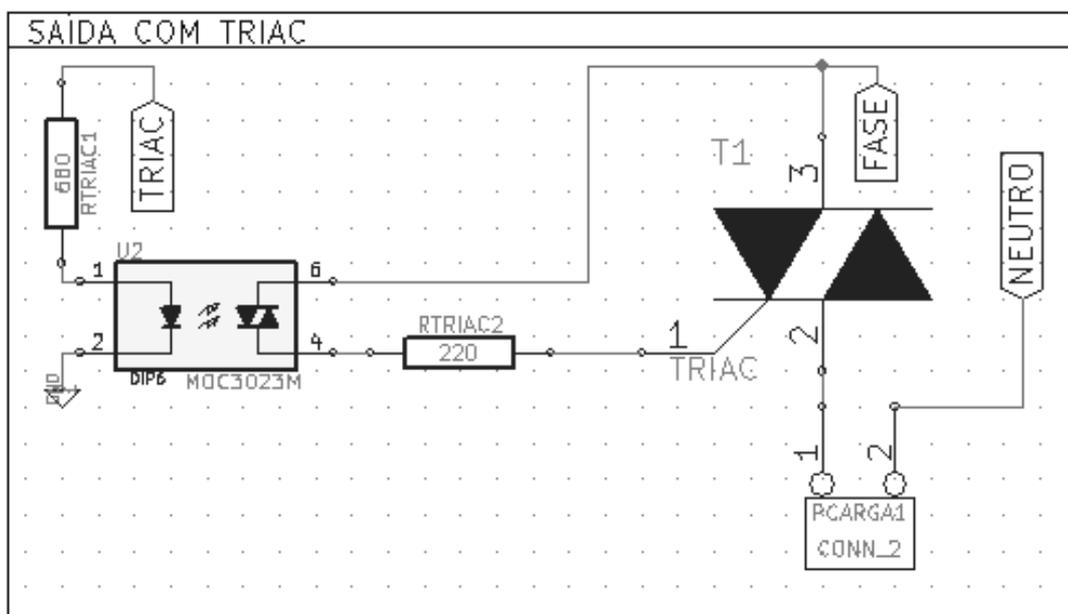
Figura 17 – Vista superior do CI (acima) e diagrama elétrico (abaixo).



Fonte: Folha técnica do componente [15].

A utilização do optoacoplador é bastante simples, o LED interno funciona como um LED comum, bastando apenas um resistor em série para limitar sua corrente. A Figura 18 mostra o circuito de acionamento do TRIAC através da saída digital do micro com o optoacoplador.

Figura 18 – Circuito de interface entre o MCU e a saída AC com o TRIAC.



Fonte: Autor.

A resistência R_{TRIAC1} da Figura 18 foi dimensionada de forma a garantir uma corrente próxima a 20 mA para alimentar o LED. A resistência R_{TRIAC2} foi dimensionada a partir dos dados de I_{GT} e V_{GT} dados na folha de dados. [14]

$$\begin{aligned} I_{GT+1} &= 2,5 \text{ mA}; I_{GT-3} = 5 \text{ mA}; \\ I_{GT} &= 5 \text{ mA}; \\ V_{GT} &= 1 \text{ V}; \\ R_{TRIAC2} &= \frac{1}{5 * 10^{-3}} = 200 \text{ Ohm}. \end{aligned}$$

R_{TRIAC2} é escolhido como o valor comercial logo acima do valor calculado, logo R_{TRIAC2} é igual a 220 ohm.

2.4.MICROCONTROLADOR PIC16F628A

O componente central deste projeto é o microcontrolador. Este dispositivo permite o controle de todos os processos, tais como a comunicação e controle do tiristor, através de uma unidade centralizada e de baixo custo.

Dentre as mais diversas marcas e modelos de microcontroladores no mercado foi escolhido o 16F628A da Microchip. Este componente se encaixa no perfil de custo, disponibilidade, facilidade de uso e recursos.[8]

Algumas das características do 16F628A foram cruciais para a sua escolha e utilização. Dentre elas estão a disponibilidade de um canal de PWM, essencial para a modulação do sinal de infravermelho, a existência de múltiplos canais de interrupção externa que é necessário para a demodulação do sinal recebido pelos vários receptores e a existência de timers e quantidade razoável de memória.

O 16F628A é um MCU de 8 bits com 18 pinos e memória *Read Only Memory* (ROM) com tecnologia Flash. Sua *Central Processing unit* (CPU) possui arquitetura Harvard, *Reduced Instruction Set Computer* (RISC). O mesmo possui uma longa faixa de frequências de operação que vai de 32kHz a 20MHz. Este MCU contém a tecnologia nanoWatt, o que o torna uma excelente escolha para aplicações embarcadas alimentadas por bateria.[8]

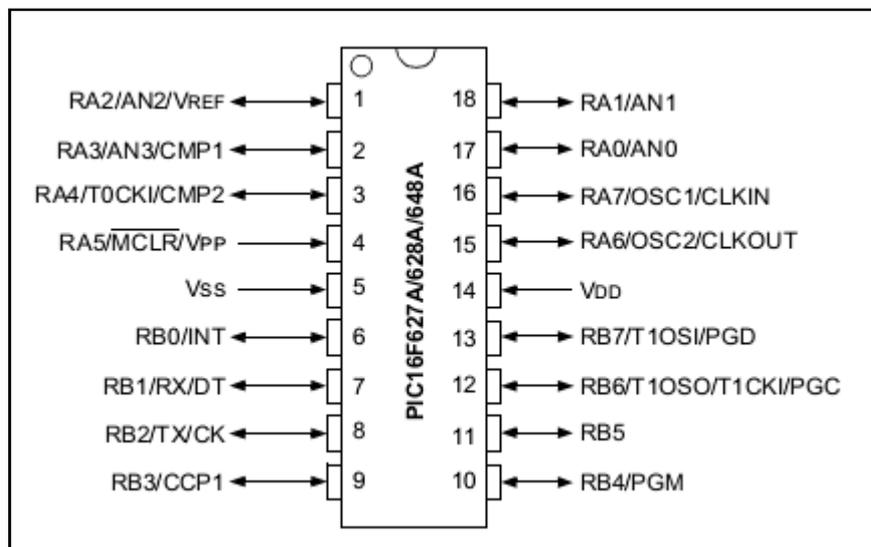
De acordo com a folha de dados do MCU seus periféricos são:

- Memória de programa (Flash): 2048 words;
- Memória *Random Access Memory* (RAM): 224 bytes;

- Memória EEPROM auxiliar: 128 bytes;
- Pinos de Entrada/Saída digital (20 mA): 16;
- Módulo CCP;
 - PWM 10 bits;
 - Captura/Comparação 16 bits.
- Módulo Comparador Analógico;
 - Dois comparadores;
 - Tensão de referência interna programável;
 - Referência interna ou externa configurável;
 - As saídas dos comparadores são acessíveis externamente.
- Timer 0: Timer e Contador de 8 bits com pré divisor de 8 bits;
- Timer 1: Timer e Contador de 16 bits com compatibilidade com cristal externo;
- Timer 2: Timer e Contador de 8 bits com pré e pós divisor de 8 bits;
- Módulo de comunicação serial síncrono/assíncrono;

O componente é fabricado em dois tipos de encapsulamento, PDIP e SOIC, neste projeto foi utilizado o modelo PDIP. A Figura 19 mostra o diagrama dos pinos do MCU.

Figura 19 – Diagrama de pinos do PIC16F628A.



Fonte: Folha técnica do componente [8].

A Figura 19 mostra o diagrama de pinos do 16F628A, o mesmo possui duas portas, A e B, de 8 pinos. Vale ressaltar que vários pinos têm sua função multiplexada entre vários módulos, por exemplo, o pino 9 pode ser utilizado com o *General Port Input Output* (GPIO) RB3 ou como CCP(PWM), não os dois ao mesmo tempo.

Além das características de velocidade e memória o PIC 16F628A foi escolhido para este projeto pela presença de certos periféricos. A modulação da informação no sinal IR é feita por *Pulse position Modulation* (PPM), porém, o próprio sinal IR é modulado numa determinada frequência portadora, esta modulação de base é feita por PWM. O PIC 16F628A possui um bloco físico de PWM chamado de CCP, o bloco CCP é autônomo e funciona independente do firmware, ou seja, não há consumo de processamento para a modulação do sinal IR, isso é possível porque o bloco CCP utiliza o TIMER2 do micro.[8]

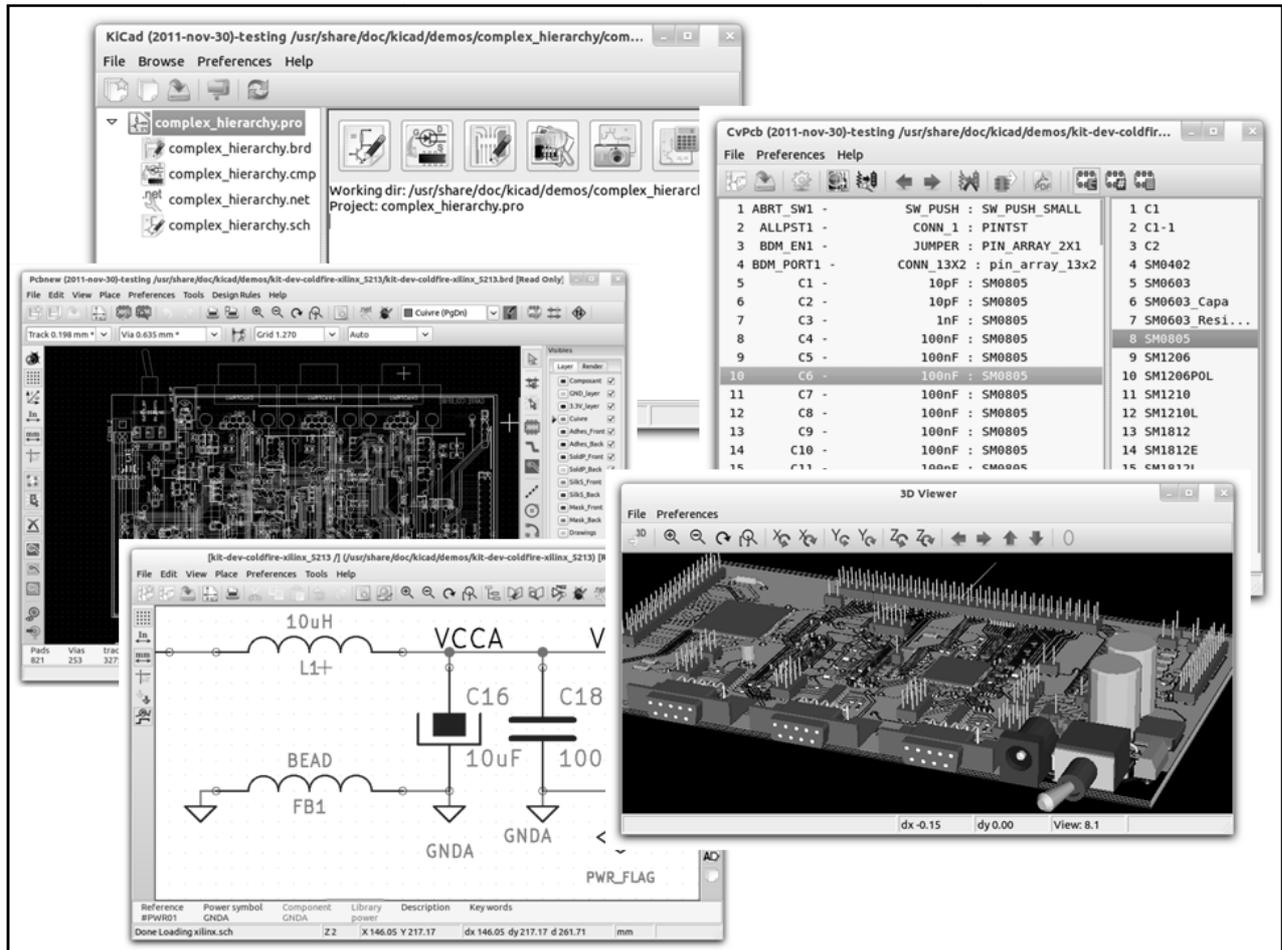
Ainda comentado sobre a etapa de comunicação, existe a outra metade do tráfego de informações que é a demodulação do sinal recebido. O sensor TSOP38 realiza a filtragem do canal IR pois o mesmo está sintonizado para a frequência portadora do sinal transmitido, o mesmo entrega na sua saída a informação codificada com PPM. O PIC 16F628A fornece o recurso de interrupção externa por mudança na Porta B, isso permite que até quatro sensores sejam conectados ao MCU de forma independente, o que permite a distribuição dos sensores em diversas orientações espaciais, aumentando o ângulo de sensibilidade do canal receptor.

Por fim o PIC 16F628A possui estruturas de temporização (Timers), que permitem realiza a demodulação PPM sem ocupar o processador para a contagem do tempo.[8]

2.5.DESIGN E PROTOTIPAGEM

Esta etapa é onde toda a modelagem do sistema se torna algo físico. Para fins de facilidade de manutenção foi adotado o software KiCad para o design da placa de circuito impresso. O KiCad é um programa computacional de código aberto multiplataforma para projeto em circuitos integrados, o mesmo facilita a concepção de diagramas de circuitos eletrônicos e suas conversões para layouts de placa de circuito impresso (PCIs). O KiCad possui ferramentas que auxiliam o projetista a criar seu projeto ao mesmo tempo que mantém o mesmo organizado. A Figura 20 mostra o layout do KiCad.

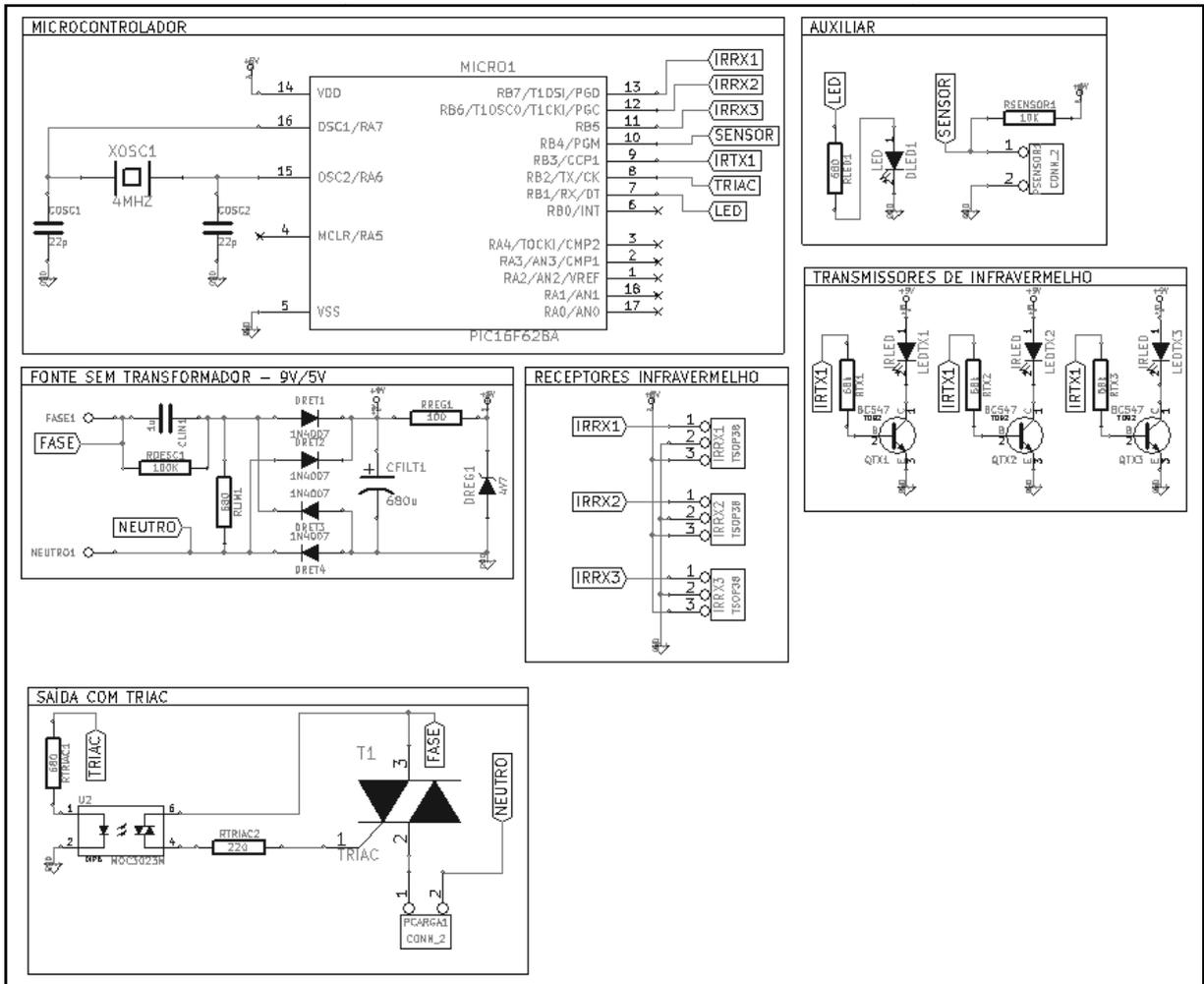
Figura 20 – Principais telas do KiCad (Imagens do site oficial).



Fonte: Site Oficial do Software.

O primeiro passo para utilizar o KiCad é o design do circuito eletrônico, isso é feito no módulo Eeschema. O Eeschema fornece vários componentes que podem ser facilmente inseridos e conectados. Partes diferentes do circuito podem ser desenhadas individualmente para melhor organização. A Figura 21 mostra o diagrama completo do circuito gerado a partir das especificações comentadas nas seções anteriores.

Figura 21 – Diagramas de circuito da plataforma de comunicação IR.



Fonte: Autor.

Ao terminar o layout do esquemático do circuito ou ao fazer qualquer alteração no mesmo deve ser gerada uma nova *netlist*. A *netlist* contém as informações sobre quais os componentes contidos no circuito e como estes se conectam. O próximo passo é importar a *netlist* no módulo CvPcb, neste componente o projetista seleciona os *footprints* que irão representar cada componente no layout da placa.

Depois de selecionar os *footprints* no CvPcb o projeto deve ser aberto no PcbNew, neste módulo o projetista irá projetar o layout da PCI, aqui devem ser respeitadas as técnicas de projeto de PCI como trilhas largas o suficiente para a corrente que passa por elas, atenção as capacitâncias parasitas geradas pela configuração das trilhas e outras. A Figura 22 mostra o layout da PCI.

Tabela 01 – Lista de custo dos materiais de uma placa

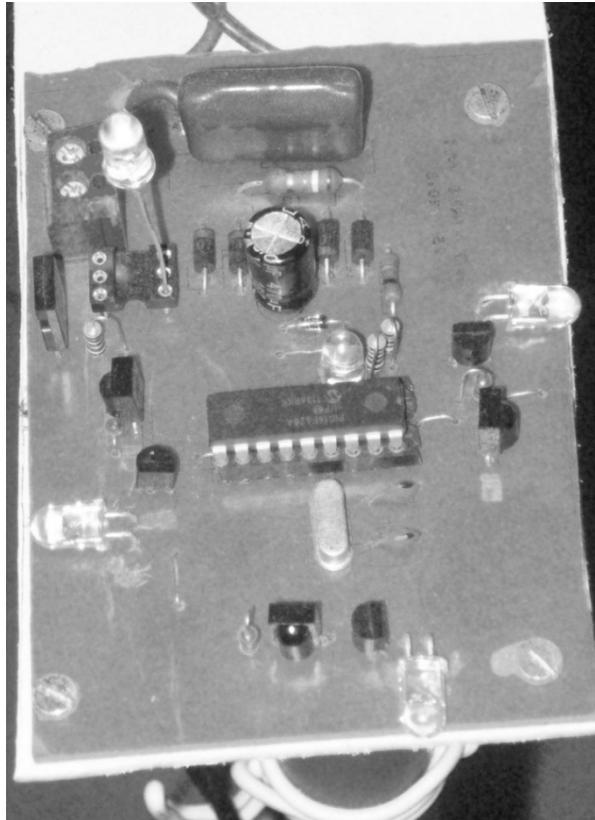
QUANTIDADE	REF. COMPONENTE	PREÇO
1	680uF @ 16v (eletrolítico)	R\$ 0,40
1	1uF @ 400V (poliéster)	R\$ 1,00
2	22p (cerâmica)	R\$ 0,20
1	LED (difuso)	R\$ 0,40
1	4V7 @ 500mW (zener)	R\$ 0,15
4	1N4007	R\$ 0,60
3	TSOP38	R\$ 2,00
3	IRLED	R\$ 1,50
1	PIC16F628A	R\$ 2,50
3	BC547	R\$ 1,35
1	100K Ohm @ 1/4W	R\$ 0,15
3	680 Ohm @ 0,5W	R\$ 0,45
1	100 Ohm @ 0,5W	R\$ 0,15
1	10K Ohm @ 1/4W	R\$ 0,15
1	220 Ohm @ 1/4W	R\$ 0,15
3	68k Ohm @ 1/4W	R\$ 0,45
1	BT134	R\$ 0,50
1	MOC3023M	R\$ 1,50
1	4MHZ	R\$ 0,60
CUSTO FINAL		R\$ 14,20

Fonte: Comércio local de componentes.

De acordo com a tabela 01 o custo médio final de uma placa, produzida em pequena escala, gira em torno de R\$ 14,00, portanto o objetivo de desenvolver uma plataforma de baixo custo foi atingido.

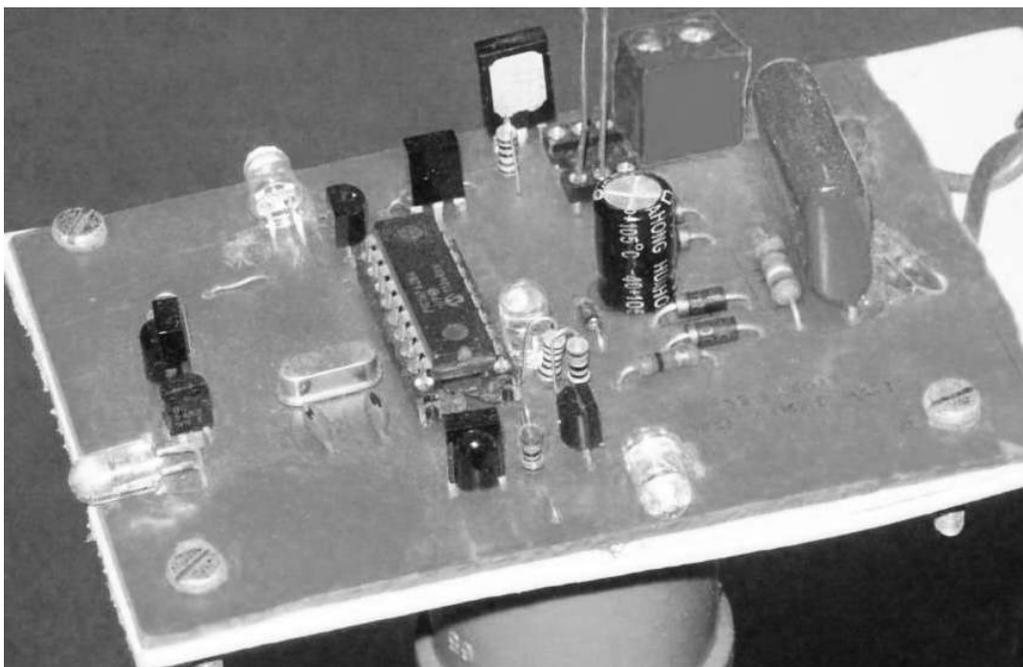
O protótipo foi montado e fixado num tripé de PVC para melhor manipular o mesmo. Ao todo foi montado três módulos IR. As Figuras 23, 24 e 25 mostram a plataforma montada.

Figura 23 – Vista superior da placa – Detalhe aos pares de LED e foto-receptores.



Fonte: Autor.

Figura 24 – Detalhe do MCU, TRIAC ao fundo e FST a direita.



Fonte: Autor.

Figura 25 – Detalhe da Placa montada sobre o tripé de PVC.



Fonte: Autor.

Como é possível ver nas Figuras 23 e 24, a placa foi montada com sucesso. Seu baixo custo aliado com o firmware capaz de portar não somente o protocolo de transporte mais também o protocolo de rede. A Figura 25 mostra o tripé de cano de PVC, este detalhe fez toda a diferença para os testes práticos, pois tornou a orientação e distribuição dos módulos mais simples e prática.

3. DESCRIÇÃO DO SOFTWARE

Esta seção contém a descrição do desenvolvimento dos protocolos de comunicação, tanto do protocolo de transporte que é responsável por carregar os pacotes físicos, e do protocolo de rede que gerencia o processo de roteamento dos dispositivos.

3.1. PROTOCOLO DE TRANSPORTE

Os processos de modulação e demodulação da informação são feitos com base no protocolo de transporte de dados. Tendo em mente o fato da necessidade do uso do ar como canal de transporte, procurou-se um protocolo de transporte que fosse imune a ruídos típicos deste tipo de comunicação.[6]

Uma vez escolhido o infravermelho como natureza do sinal transmitido, devido ao baixo custo, foi pesquisado formatos já consagrados neste meio. O protocolo NEC utiliza modulação por posição de pulso (PPM) e um padrão de 32 bits por pacote. A PPM aumenta em muito a imunidade a ruídos, pois a informação encontra-se codificada no tempo e não na amplitude do sinal. Esse protocolo permite a expansão da natureza do sinal para a rádio frequência, já que os mesmos princípios de modulação e ruído se aplicam.

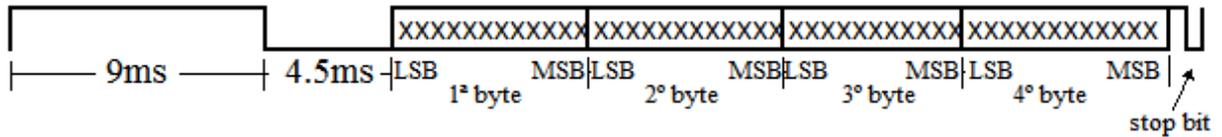
3.1.1. PROTOCOLO NEC ORIGINAL

O protocolo NEC é um padrão de transmissão de dados criado para uso com sinais de IR. Assim como a maioria dos protocolos CIR, o protocolo NEC transmite a informação através de um sinal modulado em 38 kHz, com razão cíclica de 32%. A modulação do sinal IR permite a utilização de foto receptores sintonizados, aumentando significativamente a imunidade a ruídos comuns neste comprimento de onda, como a luz do sol e fontes de iluminação artificial. A codificação dos dados binários é feita através de PPM, ou seja, o intervalo entre pulsos de duração constante. Este método de codificação torna a modulação e demodulação de dados bastante simples de ser implementada em qualquer microcontrolador.

O código NEC inicia a transmissão de um pacote com um pulso líder, também chamado de cabeçalho. Esse pulso líder serve para que o receptor possa ajustar o ganho do pré-amplificador para o valor ótimo. Esse pulso líder é um pulso modulado de 9ms seguido de um silêncio de 4.5ms. Após a transmissão do pulso segue a transmissão de 33 bits, quatro

bytes e um bit de parada. A Figura 26 mostra o diagrama temporal do pacote de informação do protocolo NEC.[6]

Figura 26 – Diagrama temporal do pacote do protocolo NEC.



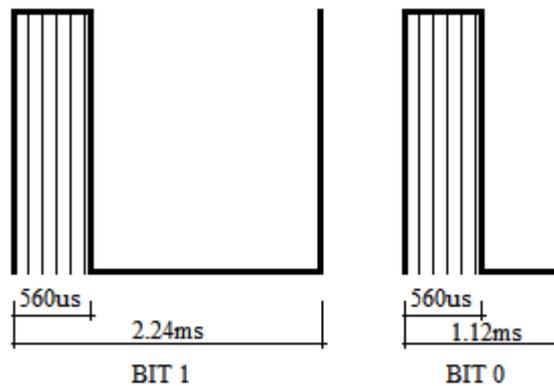
Fonte: Autor.

O objetivo original deste padrão é o controle de eletro-eletrônicos de uso doméstico. Sua meta é enviar algum comando a algum dispositivo, logo, os dois primeiros bytes estão destinados ao endereço do dispositivo os dois últimos bytes destinam-se ao comando passado para o dispositivo alvo. Embora cada pedaço de informação possua 16 bits reservados cada uma utiliza apenas 8 bits para codificação. Os bytes adicionais para o endereço e comando são destinados para o tratamento de erro de transmissão e/ou recepção. Tanto o endereço quanto o comando é transmitido na forma normal e na forma negada, se a comparação entre a informação transmitida de forma redundante divergir depois da etapa de demodulação é porque algum erro ocorreu.

O bit 1 é representado por um pulso modulado de 560 us de duração seguido por um silêncio de canal totalizando 2.24 ms. O bit 0 é representado da mesma forma que o bit 1, porém seu tempo total é de 1.12 ms. A Figura 27 mostra a codificação dos bits.

Figura 27 – Codificação dos bits 1 e 0.

Detalhe para o pulso modula em 38 kHz.



Fonte: Autor.

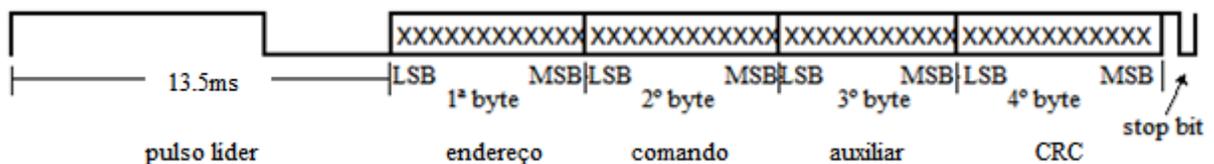
O bit de parada que representa o final do pacote do protocolo é normalmente representado como um bit 0. Embora este protocolo funcione muito bem para o controle remoto de aparelhos de TV, sistemas de som, DVDs e outros eletrodomésticos o mesmo não carrega informação suficiente para a implementação mínima de um protocolo de rede simples. Isso se dá pelo fato de que dos 32 bits úteis que o pacote carrega apenas 16 são realmente utilizados.

3.1.2. PROTOCOLO NEC MODIFICADO

O protocolo NEC original não oferece espaço suficiente no pacote de dados para o funcionamento básico de uma rede. Para que a maioria das funções de rede possam funcionar é necessário o mínimo de três bytes livres para comunicação, pois fica reservado um para endereço, um para comandos e outro para informações auxiliares, sejam de natureza de configuração ou de retorno de informação. Além disso ainda é necessário um método de detecção de erros de transmissão, porém o método de detecção de erros deve levar em consideração a informação contida nos três bytes utilizados.

Com as considerações descritas acima foi proposto o novo formato de pacote. O primeiro byte carrega informação sobre o endereço de destino do pacote, o segundo byte carrega informação sobre o comando enviado ao dispositivo de destino e o terceiro byte carrega informação de configuração, quando for necessário, ou informações previamente requisitadas. Por fim o quarto byte carrega o valor do *Cyclic Redundance Check* (CRC), esse número é calculado a partir da combinação dos três bytes anteriores e é capaz de detectar erros como a mudança de valor dos bits e a troca de bits no pacote. A Figura 28 mostra o formato modificado do pacote.

Figura 28 – Formato modificado do pacote.



Fonte: Autor.

É importante falar que, a codificação dos bits continua a mesma do protocolo NEC original. A mudança está apenas na quantidade de informação transportada e no

algoritmo de detecção de erros. Desta forma, dos quatro bytes transmitidos, três são informações úteis e o último byte é utilizado para transmitir a chave de verificação de erros.

3.2. MODULAÇÃO EM SOFTWARE

Como é mostrado na seção de hardware, os LEDs infravermelho estão conectados cada um a um transistor NPN funcionando como chave. Os transistores são excitados como chave através da saída de PWM do microcontrolador. Logo, é preciso configurar o mesmo para oscilar numa frequência mais perto possível da frequência portadora na qual o receptor IR está sintonizado, neste caso 38 kHz.

Também foi visto que o bloco físico do PWM utiliza o TIMER2 para a contagem do tempo, para determinar a frequência de oscilação do PWM é preciso configurar o TIMER2. O cálculo da carga do TIMER2 é feito através da equação 09, encontrada na folha de dados.[8]

$$\text{Eq. 09} \quad \text{Freq}_{PWM} = \frac{F_{osc}}{4 * PS * (T2 + 1)} \quad [\text{Hz}]$$

F_{osc} é a frequência do oscilador do microcontrolador, Freq_{PWM} é a frequência do bloco de PWM, PS é o pre-scaler, ou seja, o divisor do timer. Por fim T2 é a carga do TIMER2. PS e T2 são os valores configuráveis dos registradores do TIMER2, fixando o valor de PS igual a 1 o valor de F_{osc} igual a 4 MHz o valor de T2 é facilmente calculado. Substituindo o valor de PS, F_{osc} e Freq_{PWM} na equação 09, T2 é calculado aproximadamente em 25.

A razão cíclica é calculada em função da carga do TIMER2. Nesta situação é desejado uma razão cíclica de 32%, isso permite trabalhar numa região confortável entre baixo consumo energético no transmissor e boa sensibilidade no receptor, essa informação foi retirada da folha de dados do receptor TSOP38. O valor do duty cycle é $0.32 * 25 = 8$.

Neste trabalho foi utilizado o compilador PICC da CCS. O mesmo utiliza a linguagem C e facilita o processo de escrita de códigos, além disso o mesmo já conta com várias funções que facilitam a configuração do microcontrolador e seus periféricos. Para utilizar o bloco CCP1 do MCU basta utilizar as seguintes funções.

SETUP_TIMER_2(PRS, T2, PSS), onde PRS é o valor do pré-divisor, T2 é o valor de carga do TIMER2 e PSS é o valor do pós-divisor. Esta função configura o TIMER2,

isto é necessário pois, como foi dito anteriormente, este periférico é utilizado pelo bloco CCP1 para realizar a contagem da passagem do tempo.

SETUP_CCP1(PWM), esta função configura o modo de funcionamento do bloco CCP1, o parâmetro desta função pode assumir um entre alguns valores possíveis.

Tabela 2 – Valores de configuração do CCP

CCP_OFF	Desliga o bloco CCP
CCP_CAPTURE_FE	Captura na borda de descida
CCP_CAPTURE_RE	Captura na borda de subida
CCP_CAPTURE_DIV_4	Captura depois de 4 pulsos
CCP_CAPTURE_DIV_16	Captura depois de 16 pulsos
CCP_COMPARE_SET_ON_MATCH	Saída alta ao comparar
CCP_COMPARE_CLR_ON_MATCH	Saída baixa ao comparar
CCP_COMPARE_INT	Interrupção ao comparar
CCP_COMPARE_RESET_TIMER	Resetar timer ao comparar
CCP_PWM	Habilita o modo PWM

Fonte: Arquivo de ajuda do compilador.

Por último existe a função SET_PWM1_DUTY(DC), esta função permite configurar a razão cíclica em tempo de design e em tempo de execução, onde DC é um inteiro de 8 bits que representa a razão cíclica. Vale ressaltar que o valor DC varia de zero ao valor T2 utilizado na função SETUP_TIMER_2. Neste caso o valor da razão cíclica é constante e foi calculado em 8.

A configuração inicial do bloco CCP é feita da seguinte maneira.

```

SETUP_TIMER_2(T2_DIV_BY_1, 25, 1);
SETUP_CCP1(CCP_PWM);
SET_PWM1_DUTY(0);

```

Esta configuração seta o bloco CCP1 como PWM, seta a frequência do PWM em 38 kHz e a razão cíclica em 0, ou seja, nada está sendo transmitido. Para ativar o canal de transmissão basta chamar a seguinte função.

SET_PWM1_DUTY(8);

Esta função muda a razão cíclica para 32%, o que ativa os LEDs de transmissão.

3.3.ALGORITMO DE DETECÇÃO DE ERROS – CRC

A verificação de redundância cíclica é um dos métodos mais eficazes para detecção de erros numa sequência serial de bits utilizando o mínimo de hardware necessário.

A aritmética empregada no cálculo formal do CRC não é comum, a mesma é conhecida como aritmética polinomial. Os polinômios utilizados no cálculo de CRC possuem coeficientes contidos no Campo de Galois de dois elementos, GF(2). Este tipo de representação binária e de aritmética foi escolhida pois, permite uma forte integração com os sistemas digitais no qual o processo é utilizado.[4][5]

Os coeficientes dos polinômios são agrupados na forma de um número binário, desta forma a ordem do bit mais significativo representa a ordem do polinômio. A adição de dois polinômios na aritmética polinomial é equivalente a soma binária dos números que os representam, porém não existe o “vai a um” quando duas unidades são somadas.[5]

Abaixo um exemplo:

$$\begin{array}{r} 110011 \\ + 101101 \\ \hline 011110 \end{array}$$

A subtração é equivalente a adição e ambas podem ser representadas pela operação binária XOR. A operação XOR é sua própria inversa, isso é uma característica muito conveniente desta aritmética, pois agrupa duas operações em apenas uma.

$$\begin{array}{r} 011110 \\ \oplus 101101 \\ \hline 110011 \end{array} \quad \begin{array}{r} 011110 \\ \oplus 110011 \\ \hline 101101 \end{array}$$

Condensar a adição e a subtração em apenas uma operação sacrifica a noção de magnitude além da contida na posição do bit mais significativo. Por exemplo, é explícito que 1100 é maior que 0101, porém na aritmética polinomial não é possível afirmar que 1100 é maior que 1001.

$$1001 = 1100 + 0101$$

$$1001 = 1100 - 0101$$

A multiplicação é uma operação bastante simples, pois consiste na soma das repetições deslocadas para a esquerda do primeiro número. Em suma, é uma combinação entre as operações binárias AND, SHIFT e XOR.

A divisão é um processo que requer um pouco mais de atenção, pois é preciso saber quando um número é maior que outro. Desta forma utiliza-se a breve definição de magnitude discutida anteriormente, onde um número é maior ou igual a outro e a posição de seus bits mais significativos é a mesma. Abaixo um exemplo de divisão.

$$\begin{array}{r}
 101101110 \quad | 10011 \\
 \oplus 10011 \downarrow \\
 \hline
 001011 \\
 \oplus 00000 \downarrow \\
 \hline
 010111 \\
 \oplus 10011 \downarrow \\
 \hline
 001001 \\
 \oplus 00000 \downarrow \\
 \hline
 010010 \\
 \oplus 10011 \downarrow \\
 \hline
 00001 \text{ resto}
 \end{array}$$

10101
quociente

É preciso ressaltar que para qualquer alteração nos bits do dividendo existe uma grande alteração nos bits do resto da divisão, isso faz do resto da divisão uma boa escolha de checksum. Assim como a multiplicação, o processo de divisão é realizado através da repetição das operações binárias SHIFT, AND e XOR, por isso esta operação é ideal para sistemas digitais.

O último detalhe sobre o cálculo de CRC é a importância do divisor adotado na operação. O polinômio escolhido para ser o divisor, conhecido como polinômio gerador, é responsável pelo número de bits do checksum e pela maior ou menor eficácia do método. Existe uma extensa metodologia para a escolha adequada do polinômio gerador, neste trabalho foi utilizado o polinômio para CRC de 8 bits utilizado e testado pela empresa MAXIM INTEGRATED.

O algoritmo de CRC de 8 bits desenvolvido pela MAXIM utiliza o seguinte polinômio.[4]

$$x^8 + x^5 + x^4 + x^0$$

Que pode ser transcrito no seguinte número binário.

$$100110001_2$$

Realizar a divisão longa de dois números é um processo mecânico que ocupa pouca memória, mas que consome muito tempo do processador. Existem alternativas ao

cálculo da divisão longa da maneira tradicional, como por exemplo, o uso de uma *Look Up Table* (LUT) com todos os valores pré-calculados. O uso da tabela evita gastos desnecessários de tempo, porém a mesma ocupa muito espaço na memória ROM. Existe o meio termo entre o cálculo da divisão longa e o uso da tabela, neste método é utilizado alguns valores pré-calculados com o processo da divisão longa, aproveitando o conceito de divisor comum. A função utilizada, fornecida pela MAXIN numa *Application Note* é dada abaixo implementada em C.[4]

```

INT8 CRC8(INT8 CRC, INT8 DATA)
{
    INT8 AUX;
    AUX = (DATA ^ CRC) & 0xFF;
    CRC = 0;
    IF (AUX & 0x01) CRC ^= 0x5E;
    IF (AUX & 0x02) CRC ^= 0xBC;
    IF (AUX & 0x04) CRC ^= 0x61;
    IF (AUX & 0x08) CRC ^= 0xC2;
    IF (AUX & 0x10) CRC ^= 0x9D;
    IF (AUX & 0x20) CRC ^= 0x23;
    IF (AUX & 0x40) CRC ^= 0x46;
    IF (AUX & 0x80) CRC ^= 0x8C;
    RETURN(CRC);
}

```

Esta função pode ser utilizada para calcular o CRC de uma sequência de N bytes, bastando fornecer o CRC acumulado do byte anterior. Se esta função for utilizada para computar os N bytes fornecidos mais o CRC final, o resultado deve ser Zero caso não tenha ocorrido erro na transmissão e/ou recepção dos dados.

3.4.PROTOCOLO DE REDE

Os protocolos de rede definem as regras e convenções para a comunicação de dispositivos que compõe uma rede. Os protocolos de rede incluem mecanismos para que os dispositivos possam identificar uns aos outros e formar conexões entre si, também são estes

que formatam as regras que especificam como os dados estão organizados nos pacotes trafegados.[7]

Existem centenas de protocolos de rede, cada um possui sua própria aplicação. Alguns dos protocolos mais conhecidos são o UDP, o TCP e SMTP, estes foram desenvolvidos para a integração com a internet ou intranet.

Este trabalho foi pensado para ser simples e de baixo custo, logo os recursos de hardware e software são limitados o que torna inviável o uso de protocolos de redes usuais. Os principais objetivos do protocolo de rede projetado são:

- Utilizar rotinas que necessitem de no máximo três bytes por pacote;
- Capacitar os dispositivos de rede a enviar e receber mensagens endereçadas;
- Permitir o envio de pacotes em rotas não diretas (multihop);
- Permita o roteamento dos dispositivos de rede.

O processo mais importante deste protocolo é o roteamento de caminhos para o tráfego de mensagens. Com este processo bem estabelecido é garantido a capacidade de envios de mensagens em rotas não diretas, que no caso da comunicação por infravermelho é algo indispensável, pois a característica de transmissão apenas na linha de visão torna o uso de uma rede em infravermelho praticamente impossível sem capacidade de multihop.[11]

É comum em redes ad hoc o uso de protocolos de roteamento por demanda. Um exemplo clássico deste tipo é o *Ad hoc On-Demand Distance Vector* (AODV). O protocolo AODV não possui rotas fixas, quando uma mensagem requisita um caminho entre dois nós é necessário que uma mensagem de descoberta trafegue por toda a rede para estabelecer a rota.[10]

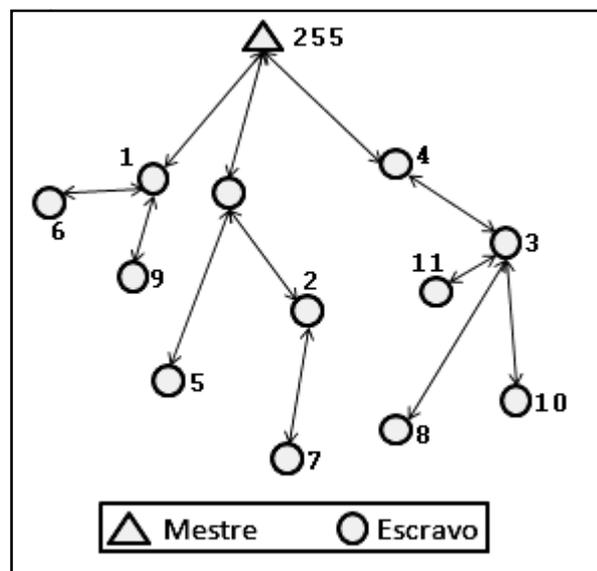
Protocolos por demanda são bastante úteis em situações onde os dispositivos de rede possuem posição e/ou orientação móvel, como no caso da telefonia celular, além disso, este tipo de protocolo não precisa de rotinas de manutenção, pois sempre que uma mensagem precisa ser enviada é feito o processo de roteamento. Porém este tipo de protocolo possui algumas desvantagens como o tráfego exagerado e possibilidade de enchente da rede. Como a mensagem passa por quase todos os módulos da rede o gasto de energia por parte destes é muito grande e por vezes desnecessário, já que, em média, a mensagem não é destinada à um determinado módulo ou a algum módulo que apenas ele possa se comunicar. Além disso, a transmissão por demanda pode ocasionar ecos de mensagens antigas caso a indexação das

mesmas não seja feita de maneira correta, isso pode ocupar o canal por tempo indefinido, degradando a disponibilidade dos serviços da rede.[3][10]

Como objetivo original deste projeto é a automação residencial ou aplicações semelhantes, considerou-se os dispositivos da rede com posição e orientação fixa ao longo do tempo. Já que os dispositivos da rede possuem posição e orientação fixas, não é preciso utilizar protocolos por demanda, pois as rotas não mudam enquanto os módulos estiverem funcionando corretamente. Desta forma basta executar a rotina de roteamento uma vez para que as rotas sejam descobertas, tais rotas devem ser armazenadas e utilizadas quando preciso.

Outra característica importante desta rede é que os pacotes têm como origem e destino apenas duas possibilidades, Mestre/Escravo ou Escravo/Mestre, pois será enviado um requisito do Mestre ao Escravo ou um sinal do Escravo para o Mestre. Isto simplifica e muito a tabela de rotas, pois não é preciso guardar as rotas de cada nó com os demais. Outra simplificação adotada é a topologia da rede, neste caso adotou-se uma topologia radicular onde os pacotes apenas trafegam em profundidade e nunca em largura.

Figura 29 – Topologia radicular dos caminhos roteados.



Fonte: Autor.

A Figura 29 mostra a organização dos caminhos de tráfego de mensagem após o roteamento. Vale ressaltar que estes caminhos não são os únicos, porém foram escolhidos por força do funcionamento da rotina de roteamento proposto.[7][11]

3.4.1. FUNCIONAMENTO DA ROTINA DE ROTEAMENTO

A rotina de roteamento deve gerar um conjunto de tabelas individuais que contem os endereços dos dispositivos dispostos num determinado caminho, aproveitou-se a existência da memória EEPROM no PIC16F628A para o armazenamento da tabela de cada módulo. Cada nó pode assumir dois papéis independentes, pai e filho. Este caráter de parentesco define a capacidade de um determinado nó passar uma mensagem adiante ou não.

O processo de roteamento é controlado pelo software no *Personal Computer* (PC), é inserida no software uma lista com todos os endereços dos dispositivos distribuídos. O software envia a cada endereço uma mensagem de *Acknowledge* (ACK), se houver resposta por parte do nó Escravo é enviado para o mesmo uma mensagem de confirmação de descobrimento. Depois de percorrida toda a lista pela primeira vez a camada mais rasa da rede estará montada, porém não há garantias de que todos os módulos tenham sido descobertos. O software manda cada nó descoberto na primeira camada enviar uma mensagem de ACK para os dispositivos que ainda não foram descobertos, caso algum módulo novo seja descoberto a mensagem é propagada para o Mestre pelo nó descobridor, o Mestre informa que o nó descobridor pode adicionar o novo módulo descoberto como filho. Quando o nó descobridor recebe a confirmação do Mestre o mesmo adiciona o endereço do nó descoberto na tabela de filhos contida na memória EEPROM, e envia um comando de confirmação de descobrimento para seu novo filho.

Este processo é repetido até que todos os nós sejam descobertos, montando uma camada por vez sempre que necessário. Este processo garante que todos os nós “visíveis” dentro da rede serão encontrados e pertenceram a apenas uma rota, que não necessariamente é a melhor rota. No final do processo de roteamento cada nó contém uma lista com o endereço dos seus nós filhos de primeira e demais ordem. No exemplo da Figura 29 o nó 1 contem a tabela {6, 9}, já o nó 4 possui a tabela {3, 8, 10, 11}.

Quando houver a necessidade do Mestre enviar uma mensagem para um nó específico basta que ele enderece a mensagem para o destino final, apenas os nós que são pai (em alguma ordem) do destino irão propagar a mensagem. Caso uma interrupção dispare um alarme e um nó Escravo precise enviar uma mensagem para o Mestre apenas os seus pais irão propagar a mensagem. O protocolo conta ainda com um buffer filtro que guarda o ultimo pacote enviado, desta forma um módulo não irá propagar a mesma mensagem duas vezes

seguida. A Figura 30 mostra os diagramas de propagação das mensagens da rotina de roteamento. A tabela 3 mostra a descrição dos comandos.

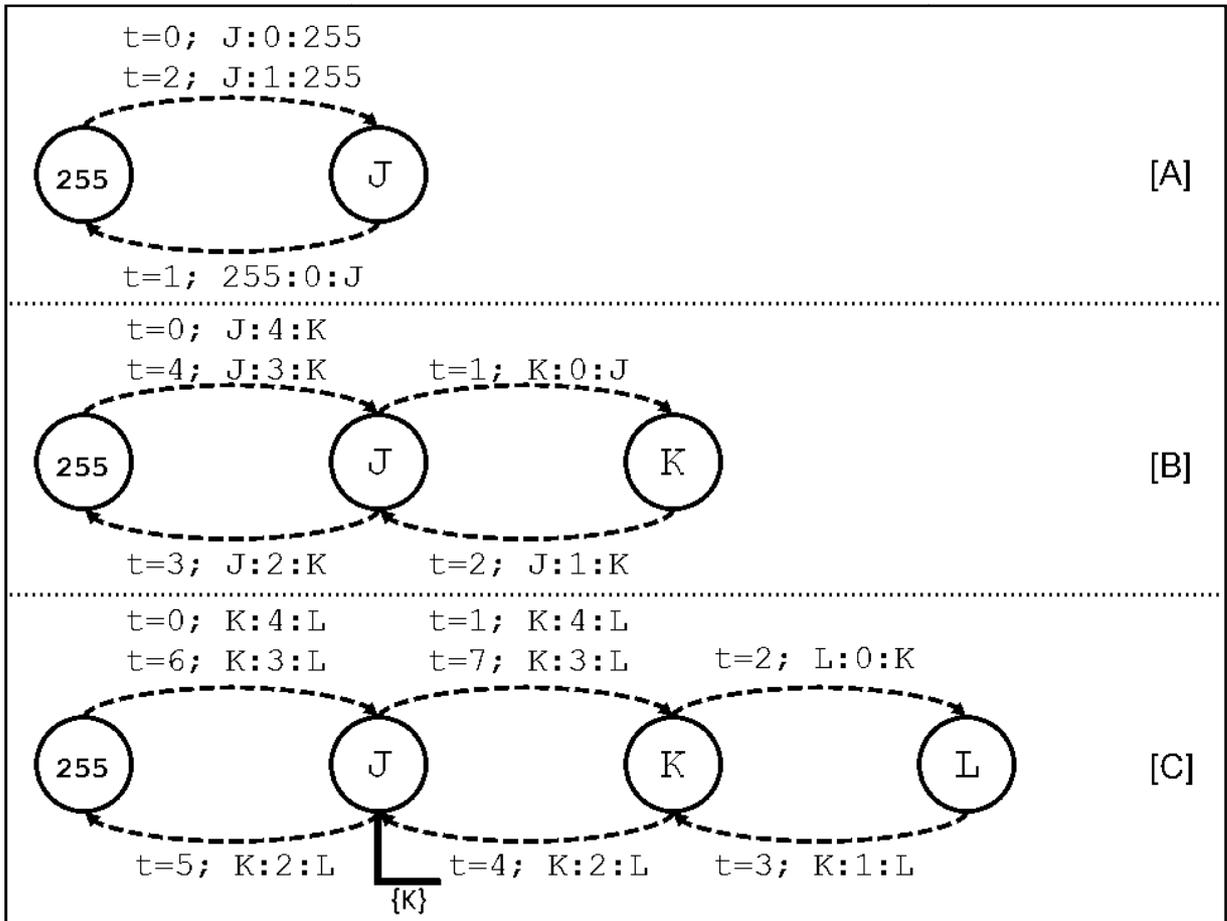
Tabela 3 – Lista de comandos do protocolo de roteamento.

Comando	Função
ADD:0:AUX	Comando de ACK de AUX para ADD
ADD:1:AUX	Resposta ao ACK de AUX para ADD
ADD:2:AUX	ADD propaga retroativamente que AUX respondeu ao ACK
ADD:3:AUX	Mestre informa a ADD que o mesmo deve incluir AUX em sua tabela de filhos.
ADD:4:AUX	Mestre requisita que ADD envie o comando de ACK para AUX

Fonte: Autor.

Os diagramas da Figura 30 mostram o procedimento pelo qual é feito o roteamento, o diagrama contém os nós na forma de círculos e as mensagens indicadas por um índice temporal e a mensagem em si no formato [ADD:CMD:AUX] que representa o endereço de destino, o comando e informação auxiliar respectivamente. Setas indicam o sentido de propagação da mensagem.

Figura 30 – Diagrama temporal do protocolo de roteamento. Parte [A] é o descobrimento direto (que forma a primeira camada), parte [B] é o descobrimento indireto sem salto e parte [C] é o descobrimento indireto com salto.



Fonte: Autor.

Como foi dito, o descobrimento direto, Figura 30.A, é feito apenas com o comando de ACK e sua resposta, esta etapa é simples e intuitiva. O descobrimento indireto sem salto, Figura 30.B, é feito na montagem da segunda camada da rede, quando necessário. O descobrimento indireto com salto, Figura 30.C, é feito para montar a terceira camada ou camadas mais profundas.

Se em algum momento durante o funcionamento rotineiro da rede, algum nó deixe de responder, basta que a rotina de roteamento seja executada novamente para que novas rotas sejam descobertas. Desta forma a própria rotina de rede é a rotina de manutenção da rede.

4. RESULTADOS

Os primeiros protótipos possuíam apenas um par emissor/receptor de IR, isso os tornava passíveis de utilização nos testes de hardware e com o protocolo de transporte mas a natureza limitada do campo de visão os incapacitava para testes com o protocolo de rede, pois não era possível abrir links físicos com mais de dois dispositivos.

Depois de determinar o uso de três pares de emissor/receptor IR e os parâmetros da FST foram construídos dois módulos Escravos e um módulo Mestre, Figuras 23 a 25. Estes módulos foram essenciais para o teste do processo de roteamento e de multihop, pois permitiu observar os problemas de congestionamento da rede e de ofuscagem de módulos vizinhos durante a transmissão de pacotes. Os testes práticos conduziram ao adição de rotinas de indexação que aumentaram consideravelmente a confiabilidade da rede.

Durante o período de testes dado ao sistema a oportunidade de funcionar durante longos períodos, máximo de 8 horas consecutivas, para verificar a integridade não apenas do firmware contra falhas e travamentos como também dos elementos de hardware como o aquecimento da fonte e vida útil da chave eletrônica.

Ao todo foram mais de 6 meses de testes com atualização constante do firmware, isso permitiu concluir o projeto de forma que o mesmo se apresenta como uma solução viável para o objetivo que se propõe.

O tempo médio de espera para entrega de mensagens entre módulos é de 200 mS, isso torna configurações com mais de oito camadas difíceis de gerenciar por conta do time out dos módulos nas camadas mais rasas. O time out do protocolo é de 2 segundos, caso não haja resposta dentro deste intervalo de tempo o módulo considera o pacote como perdido.

Os objetivos principais deste trabalho eram o desenvolvimento de uma plataforma de hardware simples e de boa relação custo-benefício que utilize comunicação por IR, e o desenvolvimento de um protocolo de rede que fornecesse um bom serviço de roteamento e entrega de mensagens com o hardware disponível.

Durante a etapa de projeto e prototipagem do hardware foi alcançado os objetivos pertinentes ao mesmo. Como é visto na tabela 01, o custo de uma plataforma aqui desenvolvida ficou abaixo de R\$ 15,00, a montagem de mais módulos tem potencial para diminuir ainda mais este custo. O hardware foi projetado com uma fonte sem transformador, a mesma garante uma alta disponibilidade de energia aliado com a baixa necessidade de manutenção, vale ressaltar que os componentes de transferência e de chaveamento de energia

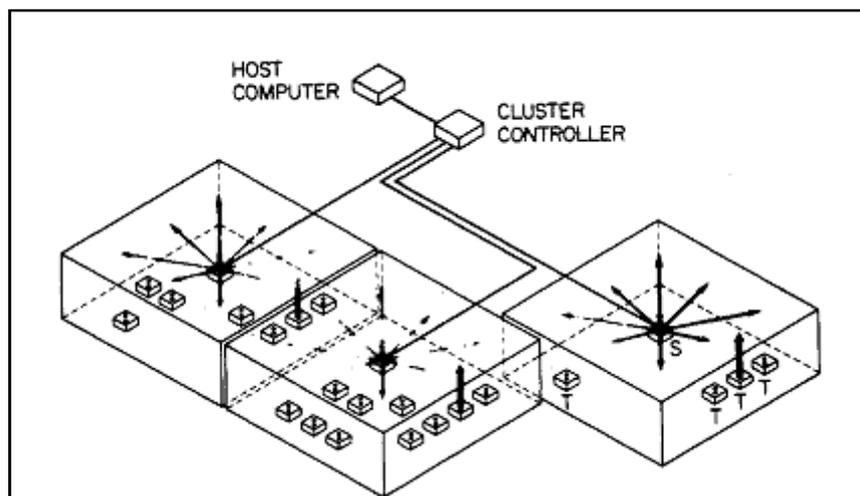
não apresentaram aquecimento excessivo durante os testes práticos, isso mostra que o dimensionamento feito no capítulo 2 foi feito de forma correta. A comunicação IR foi integrada com componentes de baixo custo que permitiram uma boa taxa de transmissão de dados e o MCU utilizado além de baixo custo possui uma grande comunidade de suporte.

O protocolo de transporte escolhido foi uma modificação do NEC, o mesmo é otimizado para o uso com os receptores TSOP38xxx, o conjunto do protocolo NEC com as regras que formam o protocolo de rede foi bem aproveitado e distribuído pelos recursos do MCU utilizado, o que resultou em um espaço ocupado de 928 words num total de 2048 words de memória livre, ocupando cerca de 45% da memória total, desta forma, a plataforma descrita neste documento apresenta uma alternativa viável e maleável para o uso com redes ad hoc não MANET (redes móveis).

5. TRABALHOS FUTUROS

Embora o projeto, no estado em que se encontra, tenha diversas aplicações no ambiente acadêmico assim como no ambiente comercial, ainda há muito espaço para melhorar. A vantagem de segurança que o infravermelho provê da margem ao problema de ambientes fechados, pois não há como dispositivos dentro de um quarto fechado participarem da rede. É então proposto o uso de um segundo meio de comunicação que não quebre com os requisitos de custo e segurança, a solução sugerida é o *Power Line Communication* (PLC) que consiste na modulação da tensão da rede elétrica com pulsos de alta frequência. Uma rede ad hoc mista IR/PLC deve ter uma maior aplicabilidade prática sem aumentar o custo de forma significativa. Como mostra a Figura 31.[11]

Figura 31 – Esquema de ligação entre os módulos IR com PLC.



Fonte: Gfeller, 1979 [11].

Outra sugestão válida é a integração da aplicação com um servidor seguro para que a rede possa ser acessada por celulares e tablets.

6. REFERÊNCIAS

- [1] KAHN, J. M.; BARRY, J. R.. **Wireless Infrared Communications**. Springer US, 1994.
- [2] CONDIT, R.; **Microchip Application Note 954 – Transformerless Power Supplies: Resistive and Capacitive**. Microchip Technology Inc, 2004.
- [3] ADAMS, N.; GOLD, R.; SCHILIT, B. N.; TSO, M.; WANT, R.; **An Infrared Network for Mobile Computers**. In Proceedings USENIX Symposium on Mobile & Location-independent Computing, 1993.
- [4] MAXIM; **Application Note 27 – Understanding and Using CRC with Dallas Semiconductors iButton Products**. DALLAS SEMICONDUCTOR, 2001.
- [5] WILLIAN, R. N.; **A Painless Guide to CRC Error Detection Algorithms**. Disponível em: < http://www.zlib.net/crc_v3.txt >. Acesso em 22 jun 2015.
- [6] VISHAY; **Data Formats for IR Remote Control**. Disponível em: < <http://www.vishay.com/docs/80071/dataform.pdf> >. Acesso em 22 jun 2015.
- [7] KAWAGUCHI, N. ;; KATAGIRI, H. ; TOYAMA, K. ; INAGAKI, Y.; **Ad hoc network system based on infrared communication**. Parallel Processing, 1999. Proceedings. 1999 International Workshops. IEEE, 1999.
- [8] **Microchip PIC16F627A/628A/648A Data Sheet**. Microchip Technology Inc., 2007.
- [9] NXP Semiconductors, “**Application Note – Thyristors & Triacs – Ten Golden Rules for Success In Your Application**”, disponível em: <http://www.nxp.com/documents/application_note/AN_GOLDEN_RULES.pdf>. Acesso em 22 jun 2015.
- [10] PERKINS, C. E.. “**AdHocOnDemandDistanceVector (AODV) Routing**”, InternetDraft,draft-ietf-manet-aodv-01.txt,1998.

[11] F. R. Gfeller and U. H. Bapst, “**Wireless in-house data communication via diffuse infrared radiation,**”Proc. IEEE, vol. 67, pp. 1474–1486, Nov. 1979

[12] VISHAY; “**IR Receiver Modules for Remote Control Systems**”. Disponível em: <<http://www.vishay.com/docs/82491/tsop382.pdf>>. Acesso em 22 jun 2015.

[13] CONDIT. R.; “**Microchip Application Note 958 – Low-Cost Electric Range Control Using a Triac**”. Microchip Technology Inc, 2004.

[14] NXP Semiconductors; “**BT134 series E TRIAC – Datasheet**”, 1997.

[15]Texas Instrument; “**MOC3020 THRU MOC3023 OPTOCOUPERS – DATASHEET**”; Disponível em: <<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/moc3021.pdf>>. Acessado em: 22 jun 2015.