

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGICA
ENGENHARIA DE COMPUTAÇÃO**

Leonardo Zanela Breunig

**ESTUDO E IMPLEMENTAÇÃO DE UM SISTEMA DE
COMUNICAÇÃO ÓPTICO SEM FIO**

**Santa Maria, RS
2016**

Leonardo Zanela Breunig

**ESTUDO E IMPLEMENTAÇÃO DE UM SISTEMA DE COMUNICAÇÃO ÓPTICO
SEM FIO**

Trabalho de Graduação apresentado ao curso de Engenharia de Computação da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para a obtenção do grau de
Bacharel em Engenharia de Computação

Orientador: Prof. Dr. Carlos Henrique Barriquello

**Santa Maria, RS
2016**

Leonardo Zanela Breunig

**ESTUDO E IMPLEMENTAÇÃO DE UM SISTEMA DE COMUNICAÇÃO ÓPTICO
SEM FIO**

Trabalho de Graduação apresentada ao curso
graduação em Engenharia de Computação da
Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS),
como requisito parcial para a obtenção do título de
Bacharel em Engenharia de Computação.

Aprovado em 12/07/2016:

Carlos Henrique Barriquello, Dr. (UFSM)
(Presidente/Orientador)

Felipe Loose, Bel. (UFSM)

Lucas Teixeira, Me. (UFSM)

Renato Machado, Dr. (UFSM)

Santa Maria, RS
2016

RESUMO

ESTUDO E IMPLEMENTAÇÃO DE UM SISTEMA DE COMUNICAÇÃO ÓPTICO SEM FIO

AUTOR: Leonardo Zanela Breunig
ORIENTADOR: Carlos Henrique Barriquello

Em um sistema de comunicação via luz visível, além do uso como iluminação podemos transmitir as informações utilizando a modulação de intensidade da luminosidade no transmissor e detecção direta no receptor, esse tipo de sistema possui faixa de livre utilização no espectro eletromagnético, além de ser mais seguro, já que a luz não ultrapassa paredes como os sinais de rádio. A implementação desse sistema utiliza componentes de baixo custo, como um micro controlador utilizado em sistemas embarcados, um LED e um fotodiodo. Com o sistema implementado é possível verificar o seu funcionamento em diferentes situações, como por exemplo a influência da distância nas transmissões, dos diferentes tamanhos de pacote, da frequência e do ângulo de incidência de luz entre o transmissor e o receptor.

Palavras-chave: Sistemas Embarcados, Comunicação, Taxa de Erro de Pacote.

ABSTRACT

STUDY AND IMPLEMENTATION OF A SYSTEM OF OPTIC WIRELESS COMMUNICATION

AUTOR: Leonardo Zanela Breunig

ORIENTADOR: Carlos Henrique Barriquello

In a communication system via visible light, and the use as lighting can transmit information using light intensity modulation at the transmitter and direct detection at the receiver, this type of system has free use range in the electromagnetic spectrum, as well as being more safe, since light does not exceed wall as radio signals. The implementation of this system uses low cost components such as a micro controller used in embedded systems, an LED and a photodiode. With the implemented system can check its operation in different situations, such as the influence of the distance transmissions, the different packet sizes, the frequency and angle of incidence of light between the transmitter and receiver.

Keywords: Embedded Systems, Visible Light Communication, Packet Error Rate.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AM	Modulação em Amplitude
ASK	Modulação por Chaveamento de Amplitude
BER	Taxa de Erro de Bit
DC	Corrente Contínua
FM	Modulação em Frequência
FSK	Modulação por Chaveamento de Frequência
FSM	Máquina de Estados Finito
IEEE	Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos
IoL	Internet via Luz
ISM	Bandas de Rádio Industriais, Científicas e Médicas
LAN	Rede de Área Local
LED	Diodo Emissor de Luz
OOK	Chaveamento Liga-Desliga
PER	Taxa de Erro de Pacote
PM	Modulação em Fase
PSK	Modulação por Chaveamento de Fase
RF	Radio Frequência
VLC	Comunicação via Luz Visível

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	08
1.1	Motivação	08
1.2	Objetivos	09
1.3	Organização do trabalho	09
2	ELEMENTOS BÁSICOS DE UMA REDE DE COMUNICAÇÃO	10
2.1	Modos de transmissão	10
2.2	Largura de banda	11
3	MODULAÇÃO	12
3.1	Definição de símbolo e bit	13
3.2	Codificação ou modulação digital	13
3.3	VLC e avaliação de erros	15
4	DESENVOLVIMENTO	19
4.1	Transmissor	23
4.2	Receptor	25
5	RESULTADOS	28
6	CONCLUSÃO	46
6.1	Sugestões para trabalhos futuros	46
	REFERÊNCIAS	47
	APÊNDICES	48

1 INTRODUÇÃO

A princípio, podemos considerar as redes de comunicação como sendo os ambientes onde um conjunto de dispositivos, enlaces de comunicação e pacotes de software permitem que pessoas e equipamentos possam trocar informações (DANTAS,2002).

Em um sistema de comunicação óptico sem fio as informações podem ser transmitidas utilizando a luz visível com modulação de intensidade no transmissor e detecção direta no receptor. Para isso podem ser utilizados por exemplo Diodos Emissores de Luz (LEDs).

Devido a evolução recente dos LEDs, eles apresentam grande potencial para iluminação, pois além de possuírem longa vida útil e maior eficiência luminosa, são componentes de baixo custo, que podem ser usados como um dispositivo de iluminação enquanto transmitem informações, por isso podem ser muito úteis em redes domésticas ou sistemas de iluminação inteligentes por exemplo, além de outros cenários com sensibilidade de custo e curta distância de operação.

A Comunicação via Luz Visível (VLC) tem sido muito estudado como uma alternativa às comunicações sem fio para ambientes fechados, como por exemplo, o padrão IEEE 802.11 para Redes de Área Local (LANs) sem fio, que operam nas bandas não licenciadas como as Bandas de Rádio Industriais, Científicas e Médicas (ISM), (por exemplo, 902-928 MHz, 2,4-2,5 GHz, 5,725-5,825 GHz). Todos os dispositivos têm permissão para usar esse espectro, desde que limitem sua potência de transmissão para permitir que diferentes dispositivos coexistam. Naturalmente, isso significa que os rádios 802.11 podem estar competindo com telefones sem fio, aparelhos para abrir portas de garagens e fornos de micro-ondas (TANENBAUM,2011).

Além disso, o VLC é uma alternativa para resolver o problema de trituração de espectro sem fio de comunicações Rádio Frequência (RF) e tem o potencial de permitir a criação de uma nova geração de sistemas de redes (GIUSTIANO; WANG, 2015).

1.1 MOTIVAÇÃO

Um sistema de comunicações óptico sem fio possui faixa de livre utilização no espectro eletromagnético, baixo custo, possui baixa complexidade além de poder ser utilizado como um sistema de iluminação eficiente.

A segurança também é uma grande vantagem desta tecnologia, pois a luz não pode penetrar paredes, o que mantém o sinal seguro dentro do ambiente, diferente de ondas de rádio, que além de pouca segurança e eficiência, pois os sinais de rádio necessitam de grande energia

e podem ser interceptados, além da possibilidade de causar interferência em outros aparelhos eletrônicos (TANENBAUM,2011).

Estamos cercados de câmeras e telas, a comunicação de dados pode ser disposta em cima dessas telas codificando informações no padrão em que os LEDs se acendem e apagam, acima do limiar de frequência da percepção humana. A comunicação via luz visível dessa maneira é inerentemente segura e cria uma rede de baixa velocidade na vizinhança imediata da tela. As luzes piscando nos veículos de emergência podem alertar os sinais de trânsito e veículos mais próximos para ajudar a limpar um caminho por exemplo (TANENBAUM,2011).

Além disso, o VLC é uma tecnologia emergente que tem atraído a atenção dos pesquisadores para aplicações em interiores, Internet das coisas e a próxima geração de redes celulares de alta velocidade (WANG; DONNO; GIUSTINIANO,2016).

1.2 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho consiste em implementar um sistema de comunicação sem fio através de luz visível utilizando um LED e um fotodiodo para efetuar a modulação e transmissão de dados.

Neste trabalho, pretende-se implementar o transmissor e o receptor de dados e utilizar um micro controlador para gerar uma modulação com Chaveamento Liga-Desliga (OOK) e uma codificação Manchester e verificar o funcionamento do sistema variando-se a distância entre o receptor e transmissor, a influência da luz no meio de comunicação, além do alinhamento, tamanho do quadro transmitido e frequência de transmissão.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O presente trabalho possui a seguinte organização: no capítulo 2 são apresentados os elementos básicos de uma rede de comunicação, os modos de transmissão e largura de banda.

No capítulo 3 são apresentados os conceitos de modulação, diferença entre símbolos e bits, codificação ou modulação digital, capacidade máxima de um sistema de comunicação, VLC e informações de erros sobre o sistema.

No capítulo 4 são apresentados o desenvolvimento do sistema, assim como os diagramas das máquinas de estados do transmissor e receptor. No capítulo 5 temos os testes realizados e os resultados obtidos, e no capítulo 6 a conclusão e sugestões de trabalhos futuros.

2 ELEMENTOS BÁSICOS DE UMA REDE

Uma rede de comunicação é composta por uma fonte geradora de informação, um transmissor de sinal, uma rede de comunicação, um receptor e um destinatário. Uma fonte é caracterizada pela geração da informação que se deseja transmitir no sistema de comunicação, a informação gerada na fonte deve ser tratada antes de se utilizar a rede e comunicação, se adequando ao meio para que possa ser transmitida.

O transmissor é o elemento responsável por converter a informação em um sinal que possa ser transmitido, é no transmissor que ocorre a modulação para que ela possa trafegar na rede de comunicação.

A rede de comunicação vem a ser o meio onde a informação trafega até chegar ao receptor que recebe o sinal da rede de comunicação e faz o tratamento necessário para que o mesmo seja recebido pelo destinatário, como a demodulação e decodificação do sinal. O destinatário é o elemento para o qual a informação da fonte foi endereçada (DANTAS,2002).

2.1 MODOS DE TRANSMISSÃO

O modo de transmissão de dados entre dois equipamentos pode ser efetuado considerando-se o sincronismo, ou não, dos relógios dos equipamentos envolvidos na transmissão. No primeiro caso, com sincronismo dizemos que a transmissão é síncrona. No segundo, dizemos que a transmissão é assíncrona.

A transmissão síncrona é caracterizada pela transferência de qualquer bloco de caracteres entre dois equipamentos de uma forma contínua. Isto é, o equipamento receptor garante que o bloco de caracteres enviados pelo remetente será recebido na mesma ordem que foi enviado.

Para que a transmissão dos sinais de maneira síncrona seja efetuada com sucesso entre dois equipamentos, podemos utilizar vários níveis de sincronização. Dentre estas técnicas, podem ser destacadas as seguintes:

- O conjunto de bits transmitidos está codificado de uma forma que o receptor pode manter o sincronismo em nível de bit;
- Todos os quadros são precedidos de um ou mais conjunto de caracteres que asseguram que o receptor vai receber a informação enviada pelo remetente corretamente;
- O conteúdo de cada quadro está encapsulado entre um par de caracteres reservados que garante a sincronização.

Na transmissão assíncrona, temos cada caractere tratado de uma forma independente quanto a sincronização de relógio e caractere. O equipamento receptor é responsável pela sincronização a cada caractere recebido. A forma que essa técnica é implementada leva em consideração o uso de caracteres adicionais. Estes são inseridos no início e no final do caractere que se deseja transmitir. Os caracteres de controle empregados são conhecidos como start bit e stop bit. Resumindo, cada caractere (ou byte) transmitido é acompanhado por um par de caracteres especiais. Para diferenciar estes caracteres, geralmente é atribuído um tempo duas vezes maior ao stop bit para que o mesmo não seja confundido com o start bit. Para efetuarmos a transmissão, precisamos modular ou codificar o sinal a ser transmitido (DANTAS,2002).

2.2 LARGURA DE BANDA

A largura de banda de um sistema de comunicações é definida como sendo a faixa de frequências que o sistema pode utilizar para transportar informações, é de grande importância por ser diretamente proporcional a capacidade de transmissão de informação do sistema, quanto mais pulsos por segundo puderem ser enviados maior será a capacidade de transporte de informação do sistema, mas antes de transmitirmos os dados, precisamos aplicar uma técnica de modulação.

Como a largura de banda é um recurso limitado pela ocupação do espectro eletromagnético, busca-se maximizar a taxa de transmissão de dados. Essa taxa por sua vez é limitada pela largura de banda e pela taxa de erros.

Sistemas VLC utilizam o espectro de luz visível, que está situado entre raios ultravioleta e infravermelho. A luz visível possui comprimentos de onda entre 400nm até 750nm.

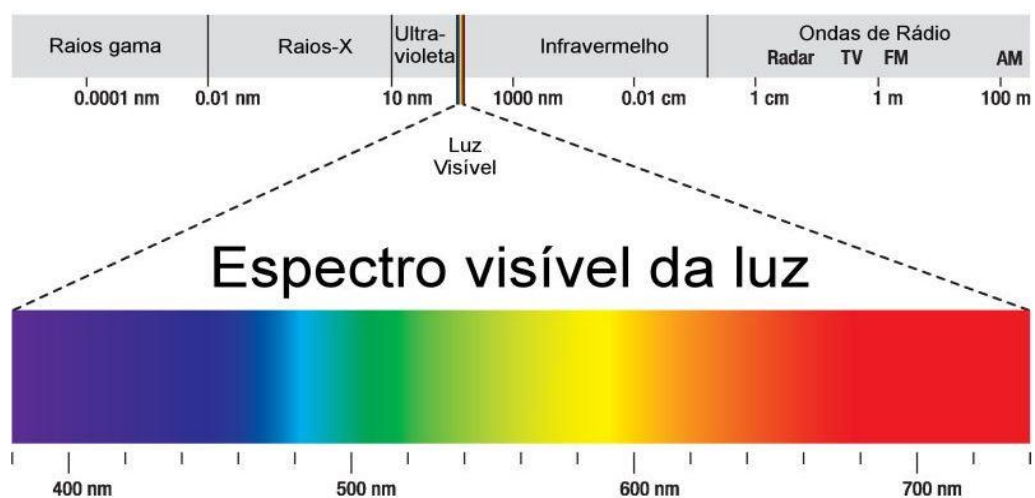


Figura 2.2.1- Espectro Visível da Luz

3 MODULAÇÃO

A modulação é um processo no qual certas características de uma onda, denominada de portadora, são modificadas segundo uma função modulante. As funções modulantes são caracterizadas pelas informações de frequência. As três formas genéricas de modulação são Modulação em Amplitude (AM), Modulação em Frequência (FM) e Modulação em Fase (PM), essas três técnicas básicas de modulação funcionam bem para sinais analógicos. Todavia, estas técnicas requerem pelo menos um ciclo de onda portadora para enviar um bit. Podemos ver essas técnicas básicas de modulação na figura 3.1 a seguir.

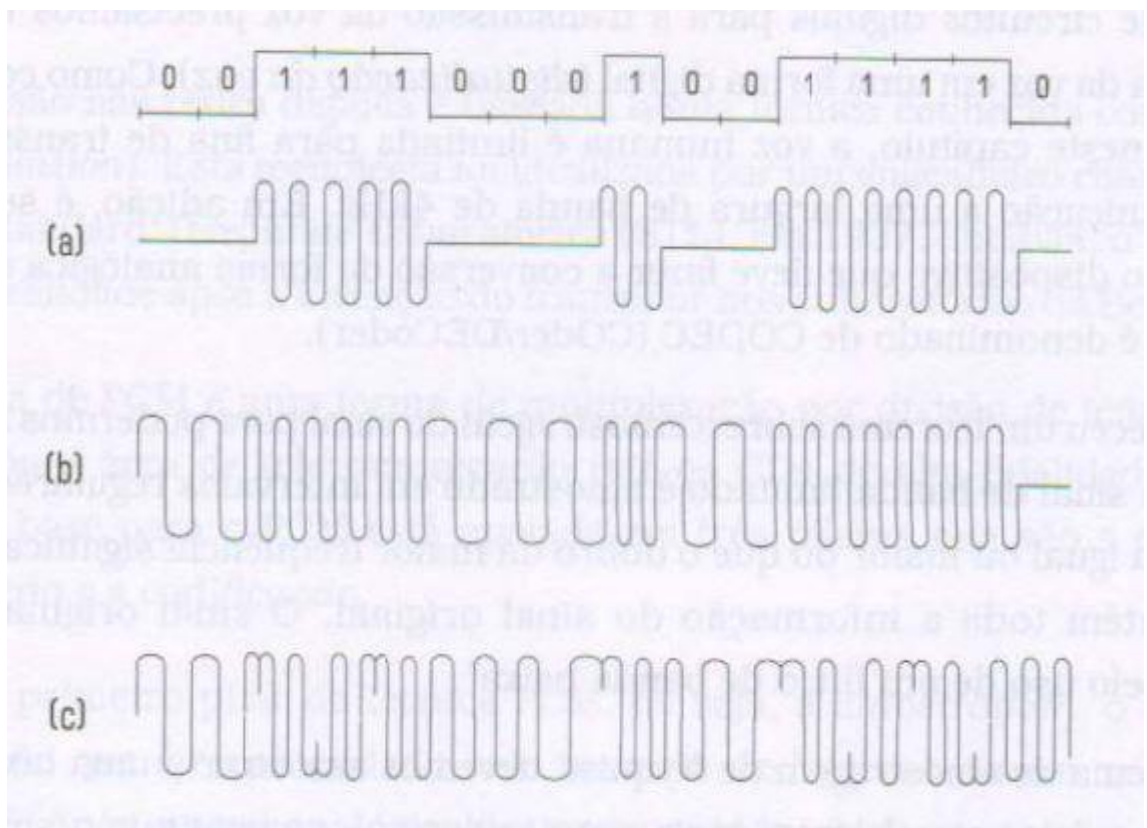


Figura 3.1-Modulação (a) AM, (b) FM e (c) PM

Visando aumentar o número de bits transmitidos num intervalo de tempo, quando consideramos a transmissão de sinais digitais, algumas das técnicas de modulação são Modulação por Chaveamento de Amplitude (ASK), Modulação por Chaveamento de Frequência (FSK) e Modulação por Chaveamento de Fase (PSK). O motivo de se empregar estas técnicas é que podemos de uma maneira precisa quantificar mais bits em um determinado intervalo de tempo. A modulação ASK consiste em alterar a amplitude utilizando um número finito de sinais distintos para representar dados digitais, utilizando um número finito de amplitudes. A modulação FSK consiste em alterar a frequência do sinal da portadora de acordo

com a informação a ser transmitida, nesse caso temos frequências diferentes para a transmissão de 0s e 1s. A modulação PSK consiste em alterar a fase do sinal da portadora de acordo com a informação a ser transmitida, nesse caso temos fases diferentes para a transmissão de 0s e 1s.

A modulação OOK é muito utilizada em sistemas de comunicação via luz visível, ela é a forma mais simples de modulação ASK, onde a presença de uma portadora representa um binário e a ausência desta representa o outro. É inclusive uma das modulações utilizadas pelo padrão IEEE 802.15.7.

3.1 DEFINIÇÃO DE SÍMBOLO E BIT

Um símbolo está bem separado de bits em conceito, apesar de ambos poderem ser representados por ondas ou funções senoidais. Bit é a unidade de informação, já o símbolo é a unidade de transmissão de energia. É a representação do bit que o meio transmite para enviar a informação. Os bits são como pequenos objetos e os símbolos como caixas nas quais os objetos serão transportados. Pode-se ter um ou mais objetos por caixa. O empacotamento de objetos por caixas é o que o processo de modulação faz (HAYKIN,2007).

3.2 CODIFICAÇÃO OU MODULAÇÃO DIGITAL

Codificação ou modulação digital é uma mudança na representação da informação de entrada para que esta possa ser transportada num sistema de comunicação digital, o objetivo da codificação é a transformação de uma informação em um sinal digital adequado as condições de uma rede de comunicação digital, na figura 3.2.1 a seguir temos alguns exemplos de codificações.

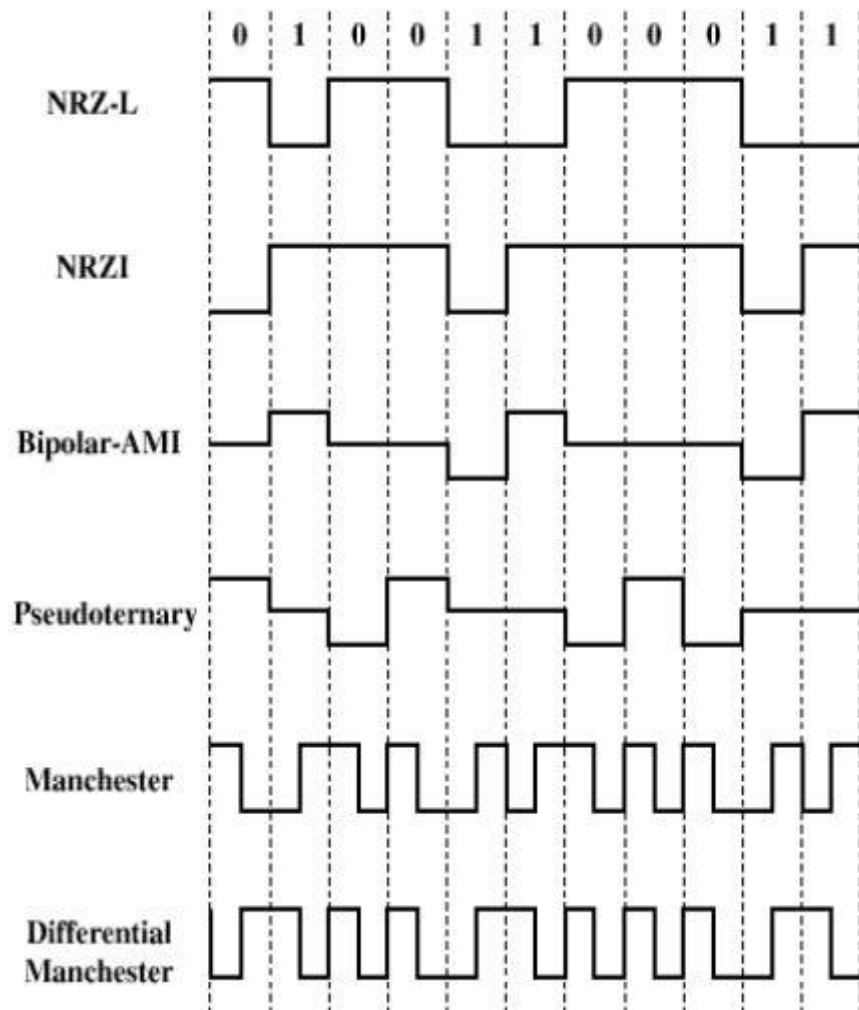


Figura 3.2.1 -Exemplos de codificações

A forma mais simples de modulação digital é usar uma tensão positiva para representar 1s e uma tensão negativa para representar 0s. Para a comunicação via luz, a presença de luz poderia representar 1s e a ausência de luz 0s. Mas essas codificações podem apresentar longas sequências de 0s, o que se torna um problema se queremos ter uma comunicação via luz visível imperceptível para os olhos humanos, por isso é preferível o uso de codificações com equilíbrio DC, como a Manchester ou a 4B6B.

Sinais com equilíbrio DC possuem média de sinal 0 se considerarmos 2 níveis alto e baixo, sendo o nível alto +1 e o nível baixo -1. No caso do VLC, podemos utilizar por exemplo 100% da luminosidade do LED para indicar o nível alto, e 0% para indicar o nível baixo, com isso conseguimos manter uma média de 50% de luminosidade, isto é possível utilizando-se a codificação Manchester.

A codificação Manchester mantém o número de 1s e 0s iguais, já que cada período do bit é dividido em metades complementares. Assim, uma transição de tensão de positiva para

negativa no meio do bit indica um número binário '1', enquanto uma transição de negativa para positiva no meio do bit indica um número binário '0'.

A codificação 4B6B mantém no máximo uma sequência de três 0s, e utiliza a seguinte tabela de conversão, como pode ser vista na figura 3.2.2 a seguir.

4-bit	6-bit
0000	001110
0001	001101
0010	010011
0011	010110
0100	010101
0101	100011
0110	100110
0111	100101
1000	011001
1001	011010
1010	011100
1011	110001
1100	110010
1101	101001
1110	101010
1111	101100

Figura 3.2.2 -Codificação 4B6B

3.3 VLC E AVALIAÇÃO DE ERROS

A comunicação via luz é utilizada a muito tempo, na figura 3.3.1 abaixo podemos ver algumas aplicações, que vão desde um semáforo de trânsito ou mesmo muito antes disso, através de códigos Morse usando uma lâmpada ou mesmo fogo (WON; SHIN; JUNG, 2008).

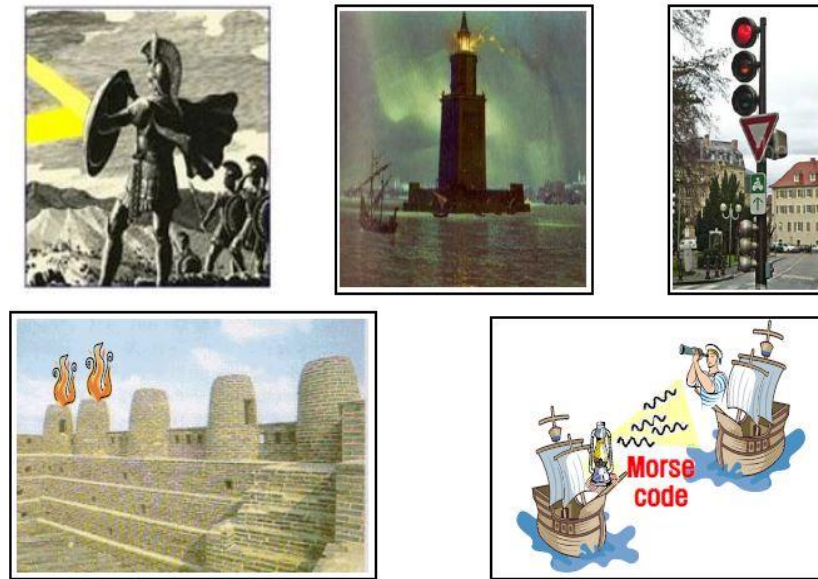


Figura 3.3.1 – Exemplos da utilização da luz para comunicação

Um sistema de comunicação através da luz visível é composto por um transmissor e por um receptor de dados, onde o transmissor pode englobar tanto a função de transmissão de dados quanto iluminação ambiente. O receptor é capaz de distinguir as variações da iluminação e recuperar os dados transmitidos (SOUZA,2013).

O espectro da banda utilizado no VLC é o da luz visível, que possui comprimento de onda entre 350nm a 750nm, com isso todos os componentes utilizados na transmissão e recepção devem funcionar para estes comprimentos de onda.

O padrão para esse tipo de comunicação IEEE 802.15.7 foi aprovado em junho de 2011, suporta alta velocidade, chegando a 96Mbps, pode ser implementado usando 3 topologias, ponto a ponto, estrela ou apenas enviar para todos. Essas 3 topologias podem ser vistas na figura 3.3.2 a seguir.

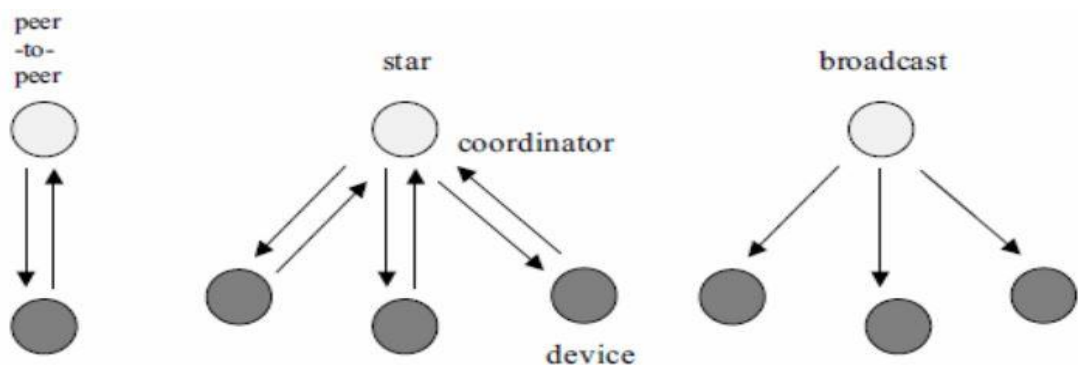


Figura 3.3.2 – Topologias utilizadas pelo padrão IEEE 802.15.7

A ideia desta tecnologia é a de proporcionar meios para transferir dados, por exemplo, dentro de uma sala emitindo luz a partir de telhado para os terminais no ambiente. A tecnologia requer basicamente uma linha de conexão de visão entre o transmissor e o receptor. A motivação para esta norma decorre do fato de que a luz visível é uma boa opção para servir como um meio comunicação útil devido às novas evoluções em domínios científicos. De fato, fontes de luz de estado sólido estão substituindo fontes convencionais como suporte físico para o sinal (PENTTINEN, 2015).

Para enviar e receber os dados, podemos utilizar LEDs e fotodiodos, o LED é um componente eletrônico semicondutor, ou seja, um diodo emissor de luz, ele é um componente do tipo bipolar, dependendo como for polarizado permite ou não a passagem de corrente elétrica e também a geração ou não de luz. Já o fotodiodo é um diodo de junção construído de forma especial, de modo a possibilitar a utilização da luz como um fator determinante no controle da corrente elétrica.

O fotodiodo possui uma junção PN semicondutor cuja região de operação é limitada pela região de polarização reversa e caracteriza-se por ser sensível a luz. A aplicação de luz à junção resultará em uma transferência de energia das ondas luminosas incidentes (na forma de fótons) para a estrutura atômica, resultando em um aumento do número de portadores minoritários e um aumento do nível da corrente reversa (SOUZA, PEREIRA, 2012).

Depois de recebido os dados, eles podem ser demodulados em um micro controlador, que é um tipo especial de circuito integrado, de uso geral, pois vem com a possibilidade de ser programado para desempenhar tarefas específicas.

No micro controlador, podemos comparar os dados recebidos com os dados enviados e obter informações do sistema como a Taxa de Erro de Bit (BER), que pode ser calculada através da equação 1 a seguir.

$$BER = \frac{\text{Bits Recebidos com Erro}}{\text{Bits Transmítidos}} \quad (1)$$

Com essa informação podemos verificar o desempenho desse sistema em diferentes condições de uso. Podemos definir a Taxa de Erro de Pacote (PER) também, que pode ser calculada através da equação 2 a seguir.

$$PER = \frac{\text{Pacotes Recebidos com Erro}}{\text{Pacotes Transmítidos}} \quad (2)$$

Podemos adicionar ao pacote de dados um bit de paridade, para verificar erros no receptor ou adotar alguma técnica de correção de erros.

No caso do VLC, a transmissão é feita de modo unidirecional, por isso não possui sinal de sincronismo entre emissor e receptor e a transmissão deve ser assíncrona, isto é, ter um sinal de sincronismo embutido no próprio dado enviado, e devemos ter um cuidado com o efeito flicker.

De acordo com estudos cerca de 1 em 4.000 pessoas são altamente suscetíveis a luzes que comutam com frequência na gama de 3 a 70 Hz. Tal cintilação pode desencadear doenças tão graves como convulsões epiléticas. Menos conhecido é o fato de a exposição a longo prazo a uma maior frequência (não intencional) de cintilação (na gama de 70-160 Hz) também pode causar mal-estar, dores de cabeça, e perturbações visuais. Os testes mostram que os humanos dificilmente sentem diretamente cintilação da luz a estas frequências mais elevadas, mas investigações indicam que a retina humana é capaz de perceber cintilação de luz de 100 a 150Hz, por isso para LEDs, recomenda-se uma frequência de pelo menos 150Hz (KEEPING,2012).

Outro problema no VLC é a interferência, o sinal recebido pode ser direto ou refletido, o atraso entre um raio luminoso direto e um refletivo pode gerar um alargamento dos impulsos, já que qualquer aumento no tempo de propagação diferente no raio direto e refletido gera interferência entre símbolos se estes forem adjacentes, gerando alargamento do pulso, limitando a taxa de sinalização (KOMINE; NAKAGAWA, 2004).

Muitos fatores podem afetar o desempenho de canais VLC. A especificação do transmissor e receptor certamente desempenha um papel importante, já que podem ser utilizados diferentes tipos de LEDs para transmissão. Já a recepção pode ocorrer com fotodiodos ou LEDs, além disso, como o caso da RF, o VLC também é sensível a parâmetros de nível de protocolo, tais como taxa de símbolo e tamanho do pacote (HEYDARIAAN; YIN; GNAWALI; PUCCINELLI; GIUSTINIANO, 2016).

4.DESENVOLVIMENTO

A implementação desse sistema realizou-se de acordo com o diagrama de blocos da figura 4.1 a seguir.

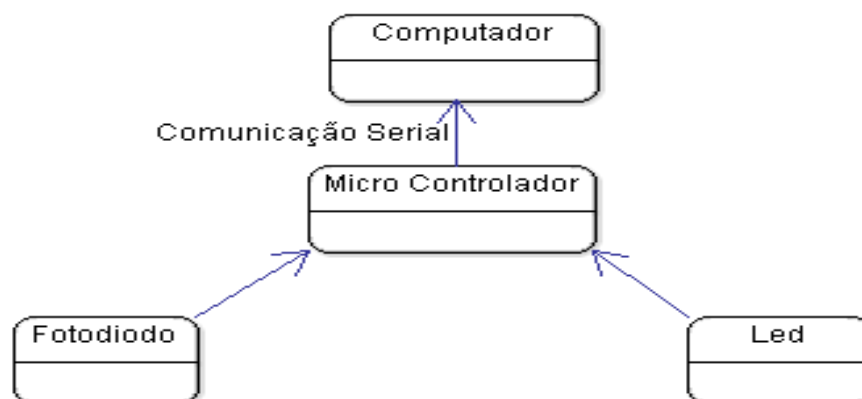


Figura 4.1 -Diagrama de Blocos do Sistema

Para implementar esse sistema utilizou-se um micro controlador Arduino nano, um fotodiodo TSC 14, além de um LED branco de 100mW e um resistor de 100Ω para limitar a sua corrente. Tanto o LED quanto o fotodiodo possuem respostas diferentes dependendo do ângulo, isso pode ser visto nas figuras 4.2 e 4.3 a seguir para o LED e para o fotodiodo, respectivamente.

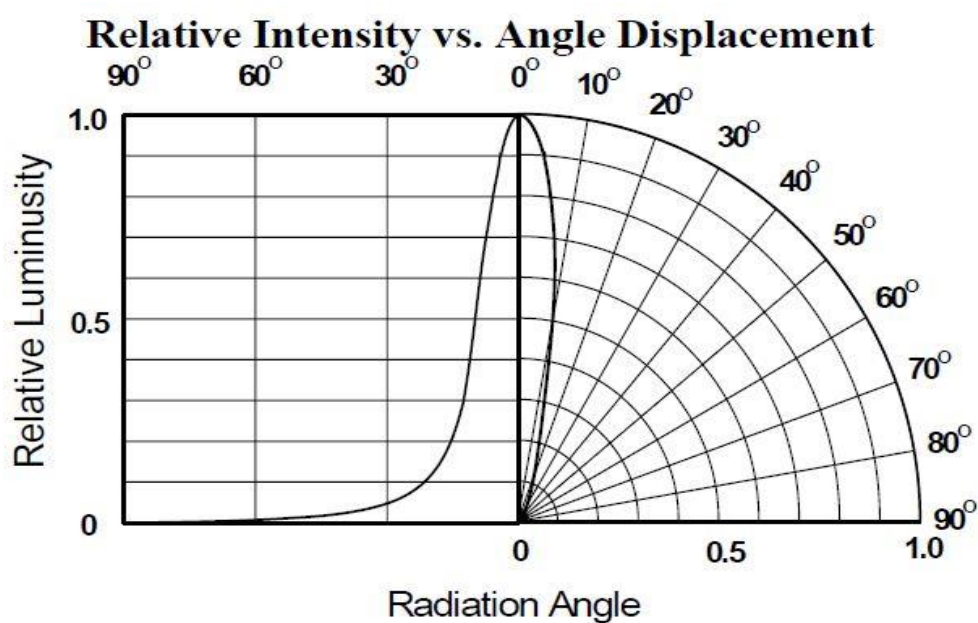


Figura 4.2 – Diagrama do ângulo de incidência de luz do LED

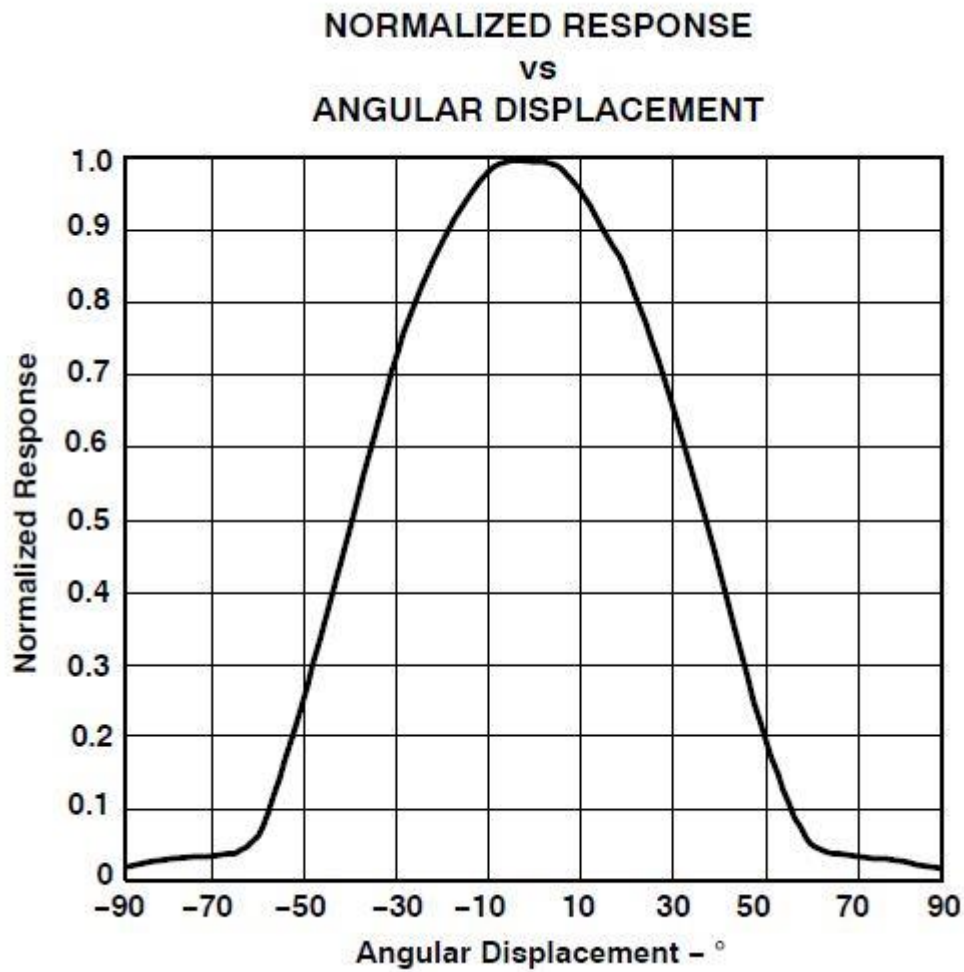


Figura 4.3 – Diagrama do campo de visão do fotodiodo

Outra informação importante são os tempos que o fotodiodo leva para alterar entre os níveis alto e baixo, já que isso poderá limitar a frequência do sistema. O fotodiodo utilizado necessita no máximo de $250 \mu\text{s}$ tanto para alterar de nível baixo para alto ou de alto para baixo.

Na figura 4.4 abaixo podemos ver as ligações do circuito, O LED foi conectado a protoboard através de um cabo de 1 metro.

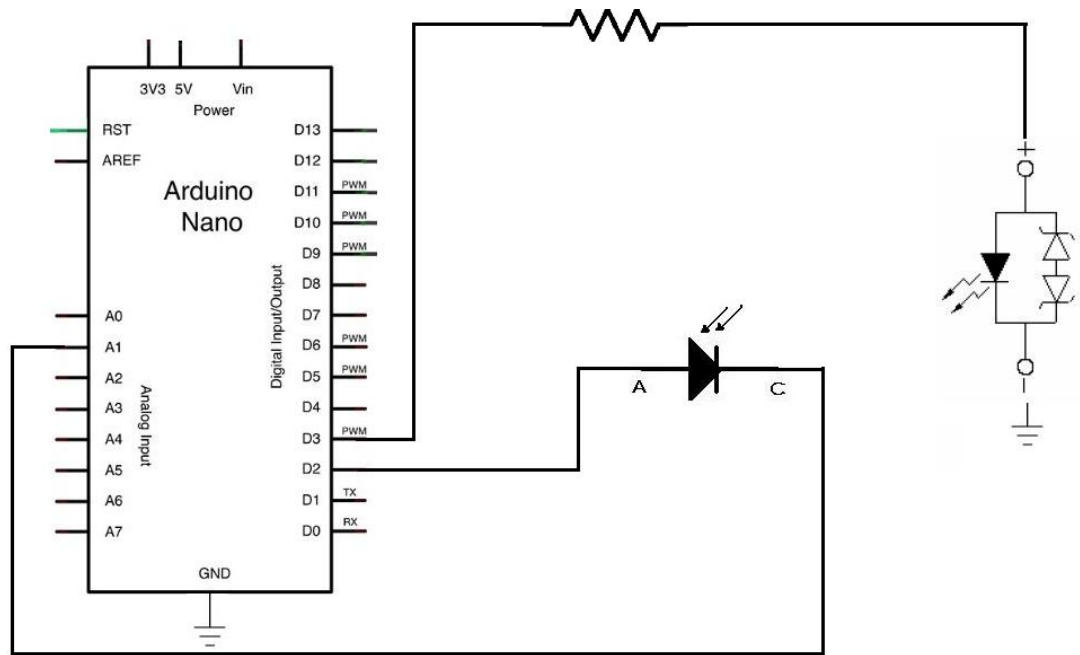


Figura 4.4 -Ligações dos Componentes no Arduino

Para efetuar o controle de um sistema de comunicação podemos utilizar uma Máquina de Estados Finito (FSM), o conceito de FSM é concebido como uma máquina abstrata que deve estar em um de seus finitos estados. A máquina está em apenas um estado por vez, esse estado é chamado de estado atual. Um estado armazena informações sobre o passado, isto é, ele reflete as mudanças desde a entrada em um estado, no início do sistema, até o momento presente. Uma transição indica uma mudança de estado e é descrita por uma condição que precisa ser realizada para que a transição ocorra. Uma ação é a descrição de uma atividade que deve ser realizada em um determinado momento. Cada estado corresponde a uma situação que ocorrerá após determinada condição.

Por exemplo em um semáforo de transito, quando o semáforo está no estado verde os carros podem prosseguir na via. Após algum tempo, é acionada a tarefa de alterar para amarelo. Então o semáforo passa de verde para amarelo. Aqui os motoristas ficam em estado de atenção e já aguardam o próximo estado. O próximo passo é passar para o estado de vermelho. Nesse estado, os carros devem estar parados na via. Agora o próximo estado somente será verde, assim os carros podem voltar a trafegar na via. Esse diagrama de exemplo pode ser visto na imagem 4.5 a seguir.

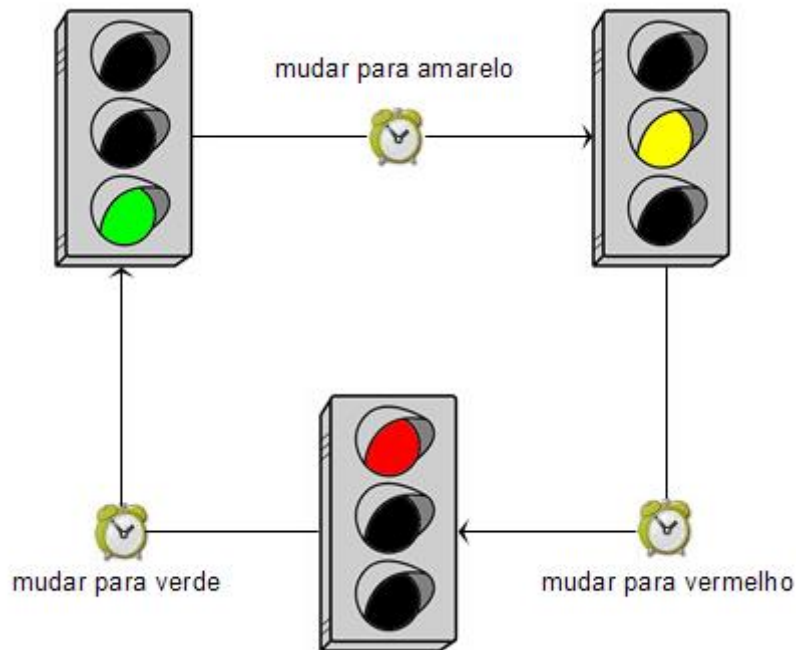


Figura 4.5 – Estados de um semáforo

Esse sistema de comunicação será controlado por 2 FSM, uma para o transmissor e outra para o receptor, ambas serão executadas em um micro controlador Arduino Nano, onde a FSM do receptor será executada no loop principal e a do transmissor será ativada por interrupções do timer, para gerar essas interrupções será utilizada a biblioteca `TimerOne.h` e a obtenção das informações referentes a erros de transmissão será via comunicação serial. Além disso, o código desenvolvido pode ser visto no apêndice A.

Nesse sistema, podem ser alteradas 3 variáveis via código, a primeira delas no receptor e as demais no transmissor. A primeira delas é um limite de luz, que consiste no valor digital referente a luminosidade que representa o nível lógico baixo, o símbolo 0 no caso, ele varia de 0 a 1023. Sem comunicação, apenas com outra lâmpada fluorescente compacta de 25W, o valor digital da leitura da luminosidade pelo fotodiodo fica em torno de 20, então para testar a comunicação nesse ambiente o valor foi definido como sendo 30, deixando assim uma margem para ruídos, e para um ambiente sem iluminação externa esse valor foi definido como sendo 2, para tentar verificar o máximo alcance desse sistema utilizando um LED de baixa potência.

Com uma alteração no código adicionando uma função de calibração, esse valor vai sendo alterado automaticamente durante a execução, lendo os valores de alto e baixo, e a partir dessa média, e com um acréscimo de um fator que seria definido pelo usuário, como um offset, o sistema identificaria o melhor valor antes de cada recepção. Essa função será descrita melhor na descrição do receptor na seção 4.2. Para a realização dos testes essa função não foi utilizada para manter o mesmo valor fixo entre os testes e comparar apenas o que foi alterado.

Outro parâmetro que pode ser alterado é o tamanho do pacote de bits que será enviado, teoricamente esse valor pode ser qualquer valor maior ou igual a 1, mas para realizar os testes foi definido com valores entre 3 até 9, já que de acordo com testes realizados anteriormente já apresentaram altas taxas de erros para pacotes de 9 bits.

E podemos também definir o intervalo de interrupções do transmissor em microssegundos, definindo assim a frequência do transmissor, que novamente pode ser qualquer valor positivo, e para realizar os testes foram definidas interrupções de tempo entre $1200\mu\text{S}$ até $4000\mu\text{S}$, testando assim transmissões com frequências entre 250Hz até 833Hz . Novamente, o limite de frequência superior foi definido através de testes realizados anteriormente.

4.1 TRANSMISSOR

O transmissor é ativado através de interrupções de tempo, a cada interrupção ele pode mudar de estado ou transmitir o próximo símbolo e continuar no estado de transmissão. Ele é composto de 5 estados e uma função, essa função é responsável pela codificação Manchester dos dados antes do envio e é executada no quarto estado, ela simplesmente aloca cada bit a ser transmitido em posições pares de um vetor de símbolos que será enviado, e faz uma operação de negação de cada bit par e armazena na próxima posição ímpar, gerando assim um vetor de símbolos onde teremos a mesma quantidade de 0s e de 1s, o que é muito importante para um sistema de comunicação via luz, pois assim mantemos a média de luminosidade estável.

Nesse sistema o bit 1 foi escolhido como padrão para ser enviado quando não está transmitindo nenhuma informação. Assim quando uma informação será enviada esse bit é alterado para o bit 0, que indica o início de uma nova transmissão. Isto pode ser observado na figura 4.1.1 a seguir, onde podemos ver a variação da intensidade de luz e os respectivos estados representados pelos números em vermelho.

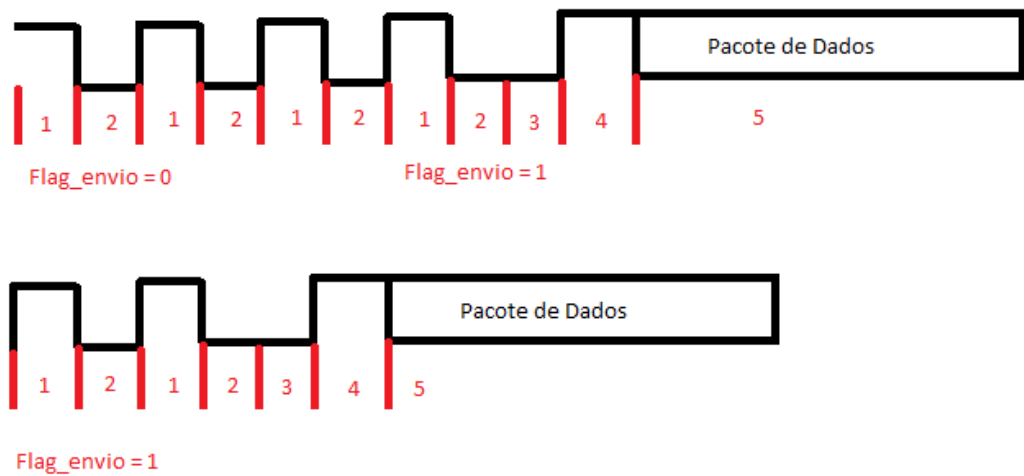


Figura 4.1.1 – Representação dos níveis de luminosidade do LED

No primeiro estado, o transmissor liga o LED e aguarda a próxima interrupção. No segundo estado, o transmissor desliga o LED e verifica se existe algum dado a ser enviado, mas antes de enviar esse estado precisa ser executado de novo, já que a forma da implementação do receptor necessita receber 2 bits 1 antes de começar a recepção de dados para verificar se existe diferença na largura do pulso e com isso verificar se houve a inversão de bit, então mesmo que o transmissor tenha alguma informação a ser enviada, na próxima interrupção o sistema irá retornar para o primeiro estado, e aí sim, na próxima interrupção irá ao segundo estado, e se tiver algum dado a ser enviado na próxima interrupção ele passará para o terceiro estado, se não ele permanecerá intercalando entre os dois primeiros estados.

No terceiro estado o LED permanece desligado, alterando o padrão agora para o bit 0, que representa que o transmissor irá iniciar a transmissão de um dado.

No quarto estado o LED é ligado, terminando o envio do bit 0 pela codificação Manchester e passa para o quinto estado, que a cada interrupção irá ler uma posição do vetor de símbolos a ser enviado, e irá ligar ou desligar o LED de acordo com esse vetor até que todo o pacote seja enviado e retorne para o primeiro estado, como pode ser visto na figura 4.1.2 a seguir.

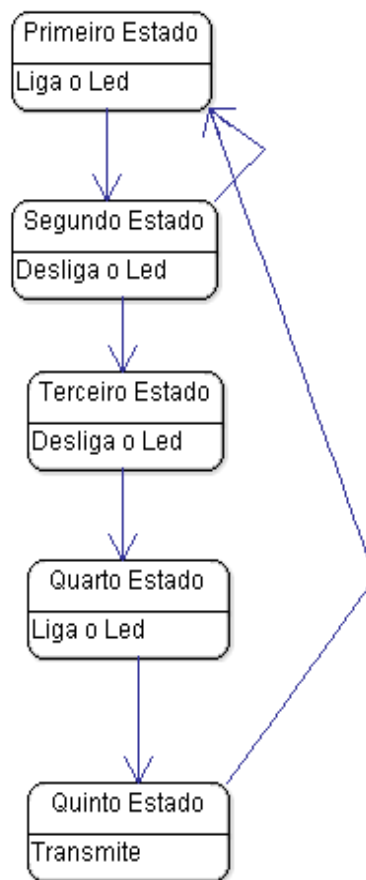


Figura 4.1.2 -Diagrama de Estados Transmissor

4.2 RECEPTOR

O receptor utiliza 4 funções e possui 6 estados, a função chamada “recebe” executa a leitura do fotodiodo duas vezes, realiza o cálculo da média deslocando um bit para direita e retorna esse valor. Já a função chamada “recebe símbolo” realiza a leitura do fotodiodo e retorna se recebeu o símbolo 1 ou 0, comparando o valor lido com aquele valor definido em limite de luz, essa função também realiza 2 leituras do fotodiodo e calcula a média antes de comparar. Existe uma função que realiza a decodificação da codificação Manchester, retornando os bits recebidos, e uma para comparar os dados enviados e recebidos e registrar os erros, enviando ao final de cada teste de 1000 pacotes recebidos a quantidade de pacotes enviados e recebidos, para comparar o sincronismo entre o transmissor e receptor, além do total de bits recebidos corretamente e com erros, todas essas informações são enviadas através da porta serial.

Uma representação geral da variação da leitura de luminosidade e os respectivos estados podem ser vistos na figura 4.2.1 a seguir.

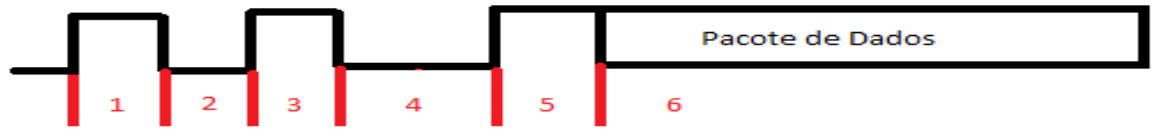


Figura 4.2.1 – Representação dos níveis de luminosidade recebidos pelo fotodiodo2

No primeiro estado o receptor aguarda a recepção de um símbolo 1, nesse estado ele começa a executar a função de calibração, guardando o valor alto para calcular o limite de luminosidade futuramente e vai imediatamente para o segundo estado, onde fica travado até receber o símbolo 0. Quando recebe o símbolo 0, ele verificaria o valor baixo e com esse valor ele calcula o novo limite de luz, como sendo a média dos valores lidos para alto e baixo mais o offset definido pelo usuário, assim esse novo limite será utilizado para a recepção desse pacote e o sistema será calibrado novamente após o recebimento desse pacote, e ele permanecerá sendo calibrado até a recepção do próximo pacote. E nesse estado ele ainda inicia a contagem de um timer em microssegundos e vai imediatamente para o próximo estado.

No terceiro estado, ele aguarda a recepção de outro símbolo 1, quando esse símbolo é recebido e calcula o tempo do símbolo 0 e vai para o quarto estado, onde aguarda a recepção de outro símbolo 0, e dispara outro timer em microssegundos e muda para o quinto estado.

No quinto estado ele aguarda a recepção de um símbolo 1, quando esse símbolo é recebido ele efetua novamente o cálculo do tempo do símbolo 0, se a duração desse símbolo for 1.5 vezes maior, quer dizer que agora ele recebeu um bit 0 e antes um bit 1, já que o bit zero após um bit 1 tem o dobro do tempo, mas considere uma margem, por isso 1.5 vezes. Isso quer dizer que uma transmissão irá começar, então ele vai para o sexto estado, se não ele retorna para o primeiro estado, por esse modo que foi implementado o receptor que são necessários 2 bits 1 antes de enviar o pacote de dados.

No sexto estado, ele aguarda o tempo de um símbolo que foi armazenado no segundo estado e armazena o valor recebido após aguardar esse tempo, ele continua fazendo isso até receber todo o pacote, por isso o tamanho do pacote deve ser definido no receptor também. Após receber todo o pacote ele executa a função que decodifica os dados e a função que verifica os erros, após isso retorna ao estado inicial, como pode ser visto na figura 4.2.2 a seguir.

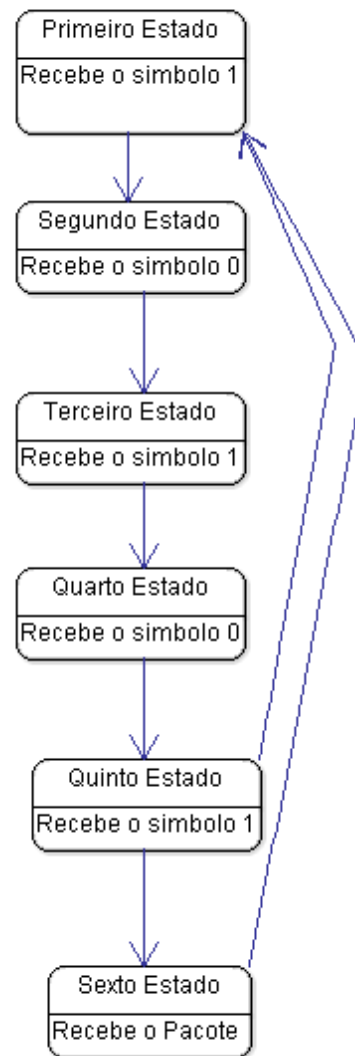


Figura 4.2.2 - Diagrama de Estados do Receptor

5. RESULTADOS

Foram realizados testes em um ambiente com iluminação externa de uma lâmpada fluorescente compacta de 25W sobre o sistema variando-se a distância e 6 diferentes pacotes de bits, e para um ambiente escuro variando se a distância, 6 diferentes pacotes de bits, frequência, ângulo e tamanho do pacote. Os testes de reflexão não foram realizados pois o LED utilizado era muito fraco.

As combinações de pacotes de bits escolhidas para os testes foram 0000, 0101, 0110, 1001, 1010, 1111. Essas combinações de bits foram escolhidas para reduzir o número de testes, já que eles representam bem todo o conjunto, pois iniciam e encerram com as 2 possibilidades, possuem transições de alto para baixo, de baixo para alto, de baixo mantendo baixo e de alto mantendo alto. Na figura 5.1 abaixo podemos ver os símbolos na codificação Manchester que representam esses bits.

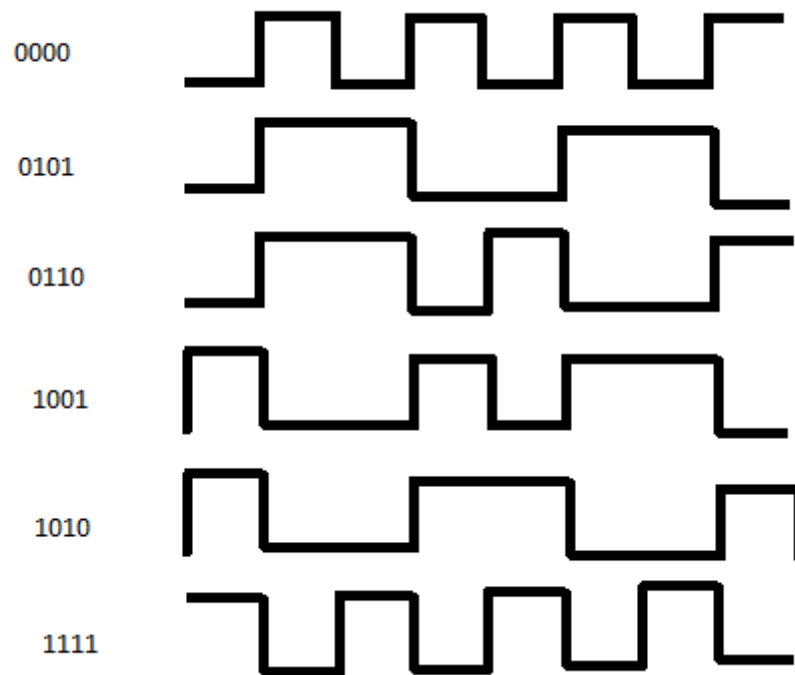


Figura 5.1- símbolos enviados

Para cada teste foram enviados 1000 pacotes de bits 10 vezes, calculado a média de erro para cada teste. O intervalo de confiança foi definido com 5% de erro para o PER. A BER traria informações melhores, como por exemplo se o sistema teria um ganho elevado utilizando um bit de paridade, mas como os pacotes utilizados no teste contem 4 bits, a PER não é uma medida de erro muito distante, e como ela vinha sendo realizada anteriormente optou-se por continuar utilizando essa medida de erros.

A figura 5.2 a seguir mostra a realização dos testes no ambiente com iluminação externa, o ambiente estava sendo iluminado por uma lâmpada fluorescente compacta de 25W. a protoboard foi fixada sobre uma canaleta e o LED também, deste modo a distância entre o fotodiodo e o LED pode ser alterada sem alterar o ângulo.

Já a figura 5.3 mostra a realização desses mesmos testes, só que agora sem a iluminação externa, e a figura 5.4 mostra os testes de ângulo, onde utilizei uma folha com os ângulos desenhados como orientação e agora tanto o LED quanto a protoboard foram removidas da canaleta para continuarem da mesma altura.

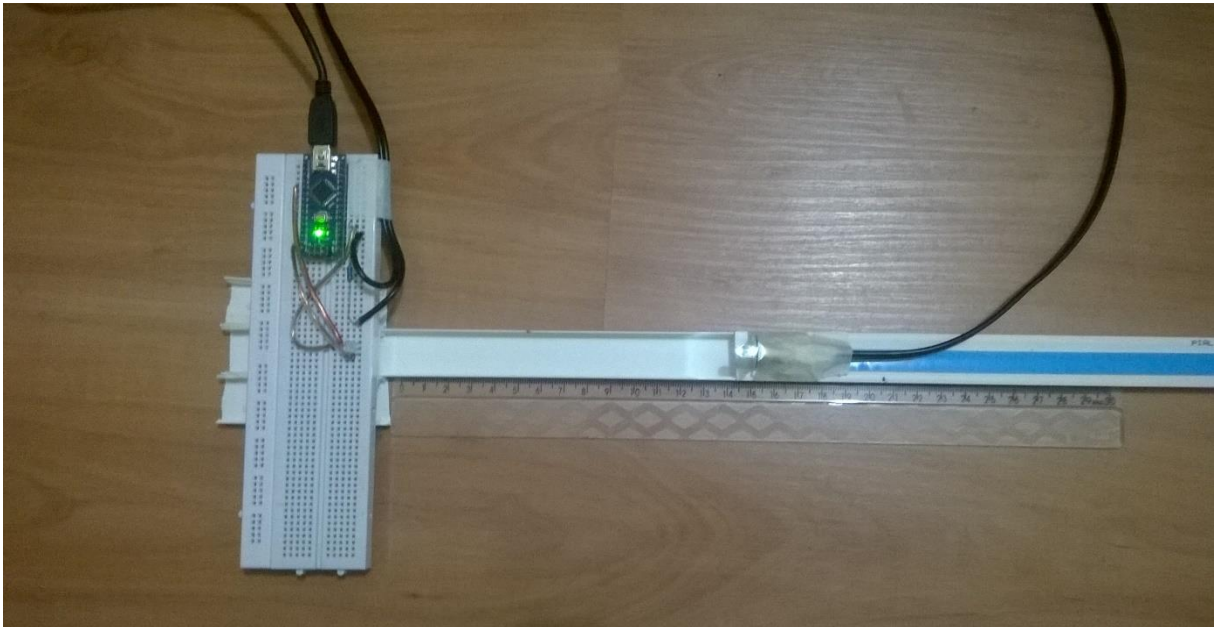


Figura 5.2 - Teste de Distancia em Ambiente Iluminado

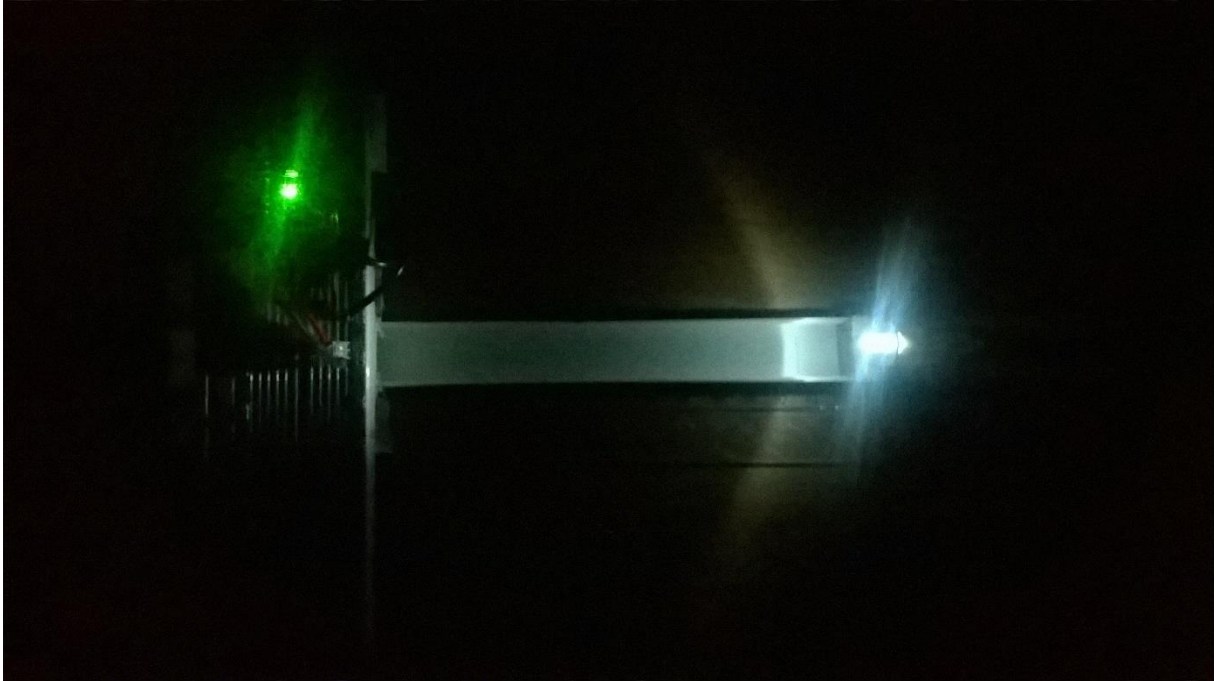


Figura 5.3 - Teste de Distancia em Ambiente sem Iluminação



Figura 5.4- Teste de Angulo em Ambiente sem Iluminação

O sistema foi configurado de duas maneiras em todos os testes, uma para o modo claro e outra para o modo escuro, o desempenho inferior no escuro pode ser atribuído a essa configuração, já que o objetivo do teste no ambiente com iluminação externa era voltado para a possibilidade de transmissão em um meio com outras interferências luminosas. Já para o ambiente escuro era voltado para verificar a máxima distancia que esse sistema conseguiria

atingir utilizando apenas um LED de baixa potência. Desse modo ficou com uma tolerância muito menor a ruídos para o escuro, a seguir temos a PER para esses dois casos.

Este teste só compara a PER de cada pacote de dados, dentre esses 6 escolhidos, a uma distância de 15 cm. Essa distância foi também foi escolhida através de resultados de testes realizados anteriormente. Inicialmente temos o resultado do teste para o ambiente com iluminação e após sem iluminação externa. Vistos respectivamente nas figuras 5.5 e 5.6.

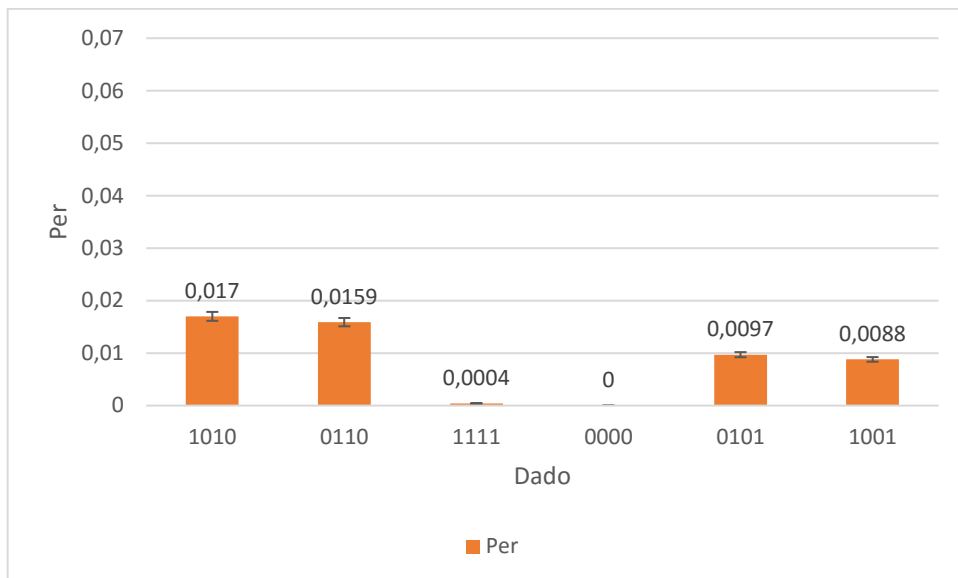


Figura 5.5- Teste de dados em ambiente iluminado

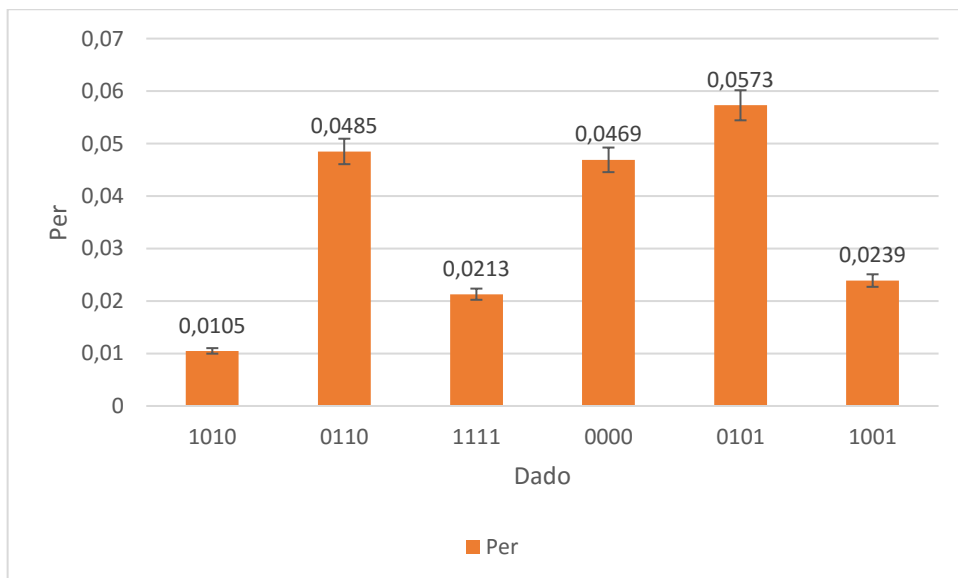


Figura 5.63 - Teste de dados em ambiente não iluminado

Como o teste para ambiente escuro foi feito com uma margem muito pequena para ruídos comparada com a margem utilizada para o ambiente claro, não ficando uma comparação justa, já que o ambiente escuro acabou ficando mais sensível a variações. Sendo assim utilizada apenas para termos um levantamento da diferença dos dados em si para os demais testes.

Nas figuras 5.7 até 5.12 a seguir estão os resultados dos testes de distância no ambiente com iluminação externa para cada uma das 6 combinações de bits, respectivamente. Já nas figuras 5.13 até 5.18 vemos os resultados dos testes de distância para o ambiente sem iluminação. Para o ambiente escuro foi utilizado um limite de luz de 2, para o claro de 30, para ambos os casos foi utilizada uma frequência de 500Hz e pacotes de dados de 4 bits.

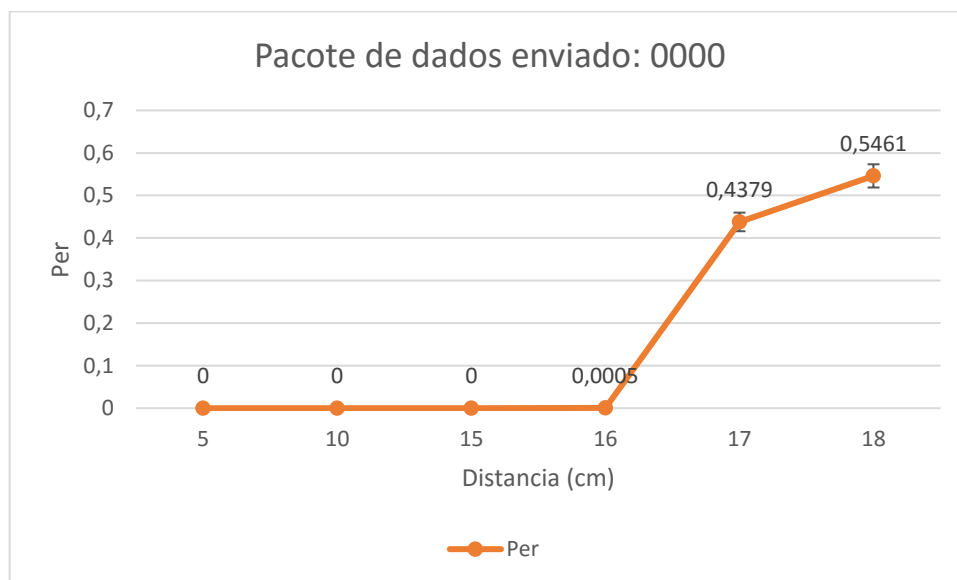


Figura 5.7 - Teste de Distância em ambiente iluminado

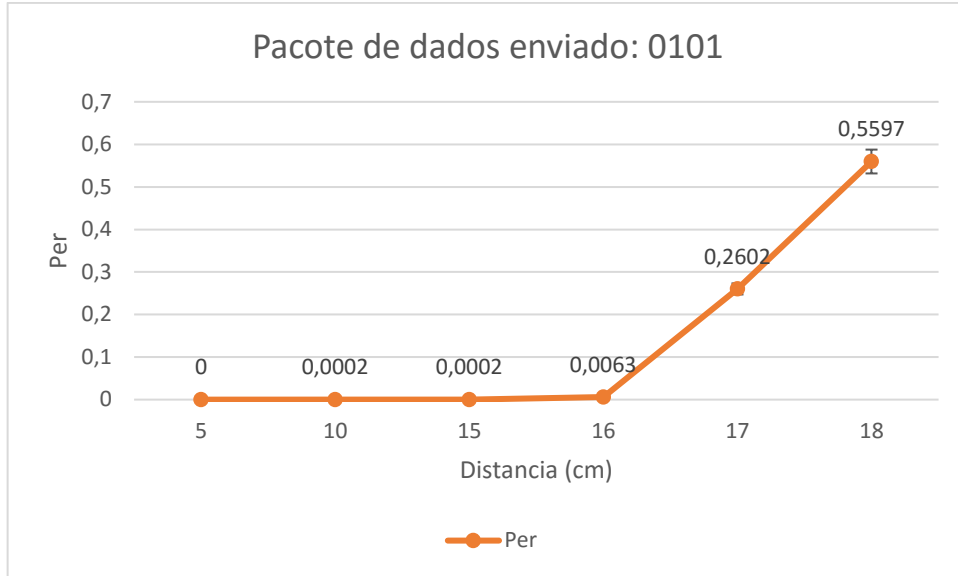


Figura 5.8 4- Teste de Distância em ambiente iluminado

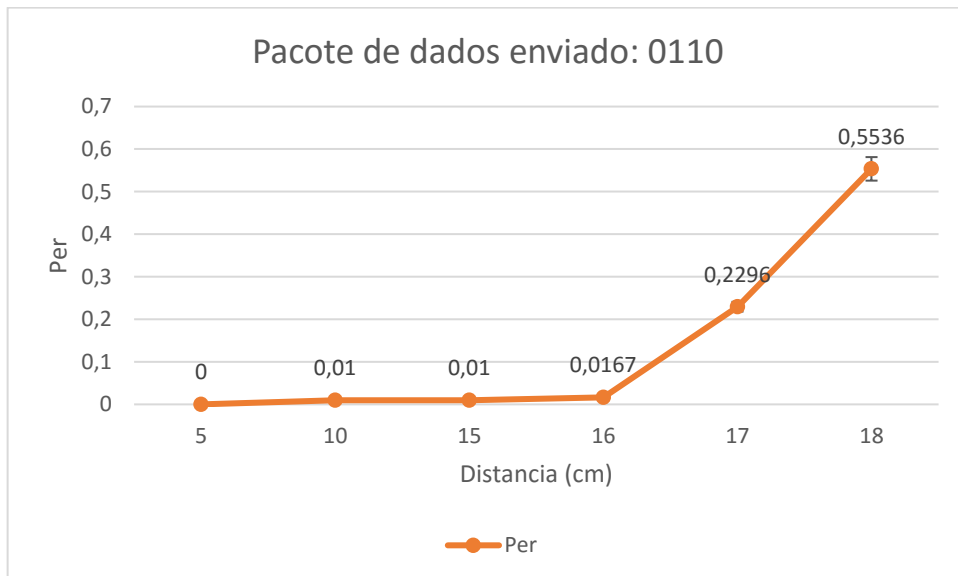


Figura 5.9 -Teste de Distância em ambiente iluminado

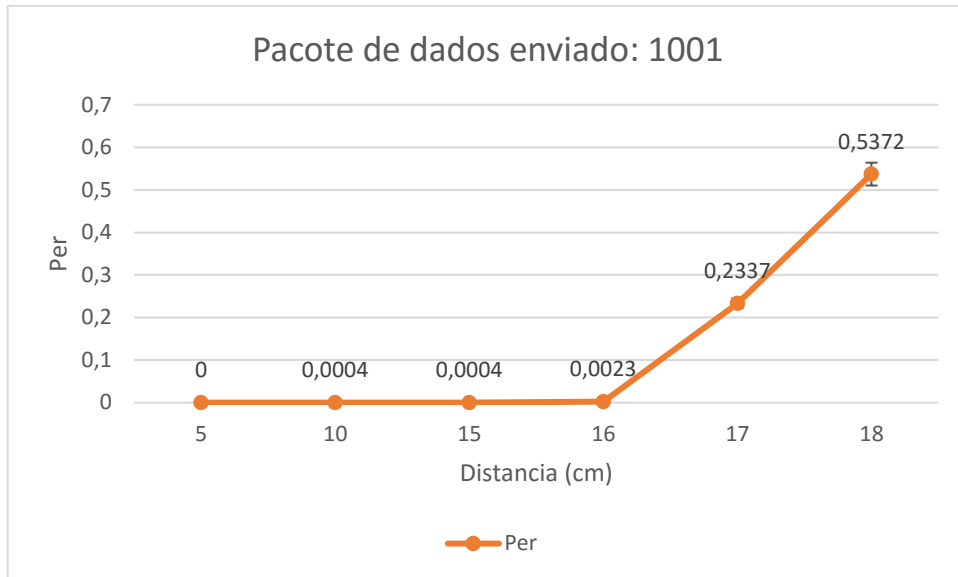


Figura 5.10 -Teste de Distância em ambiente iluminado

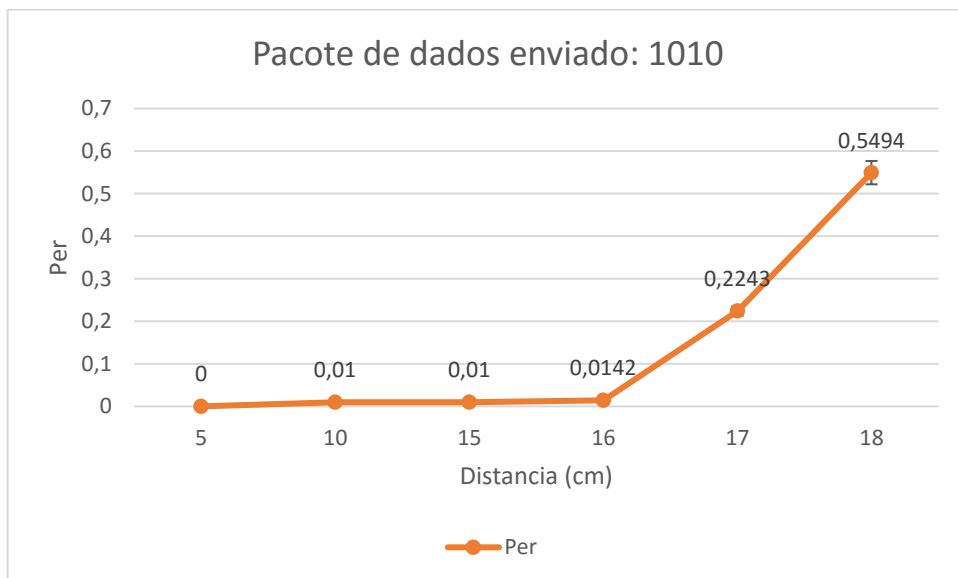


Figura 5.115-Teste de Distância em ambiente iluminado

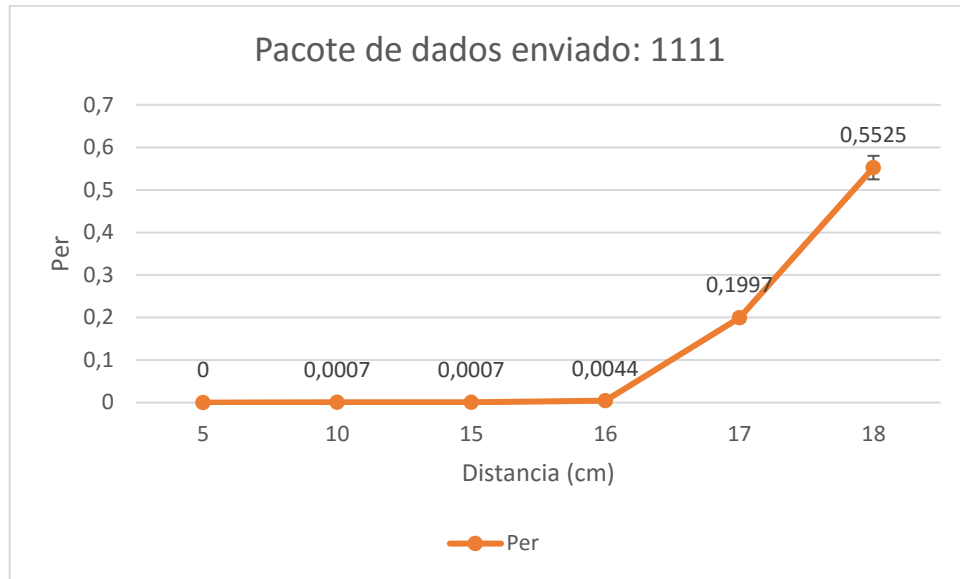


Figura 5.12 -Teste de Distância em ambiente iluminado

A partir de 18 cm o receptor começou a ter problemas para detectar o início das transmissões no ambiente claro. Já que o que o receptor considera como símbolo 1 não é atingido pelo LED utilizado, que mesmo ligado não é detectado pela interferência da iluminação externa no ambiente, por isso o receptor considera como sendo o símbolo 0. Isso foi percebido visualizando o nível de luminosidade lido em cada estado em testes anteriores, por isso a distância nesse ambiente foi testada apenas até 18 cm.

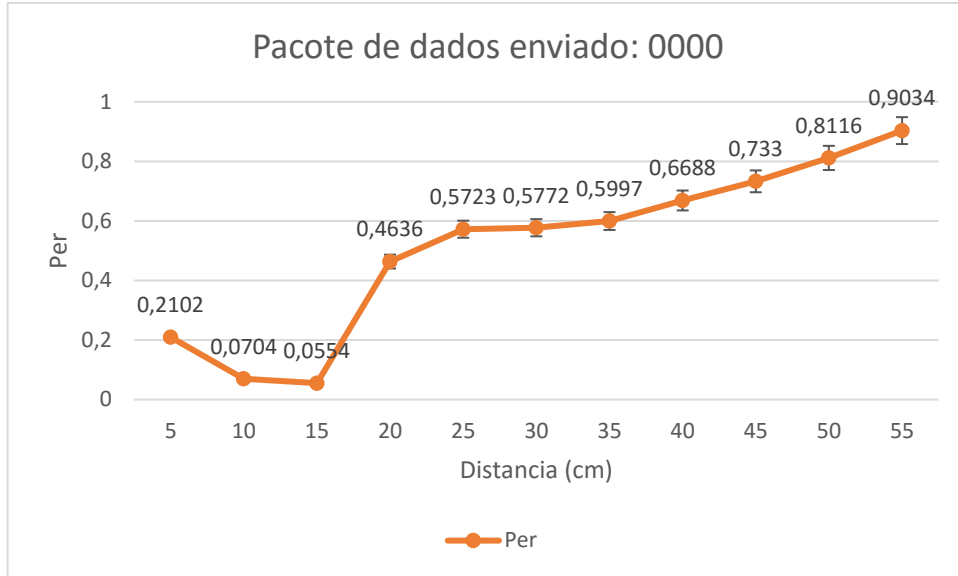


Figura 5.13 -Teste de Distância em ambiente não iluminado

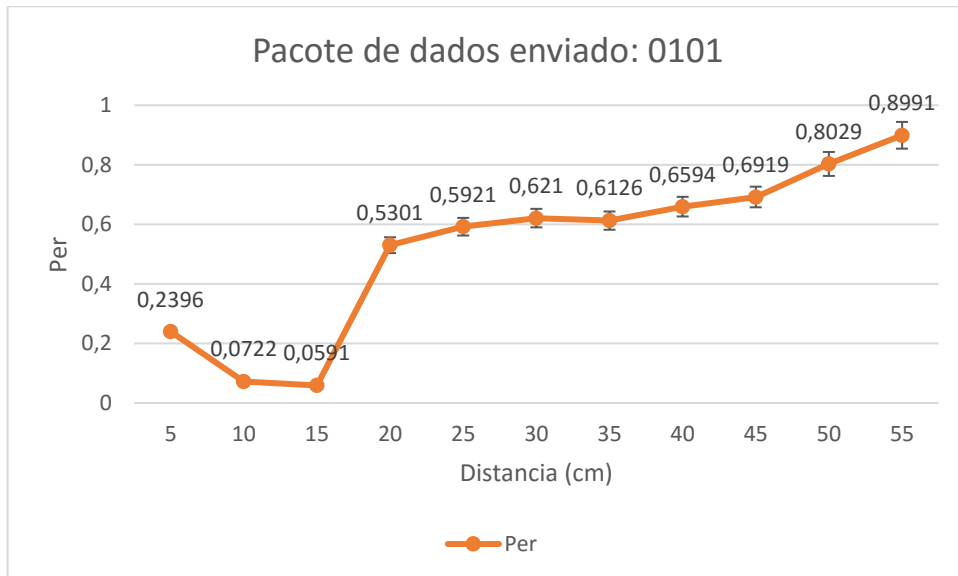


Figura 5.14 6-Teste de Distância em ambiente não iluminado

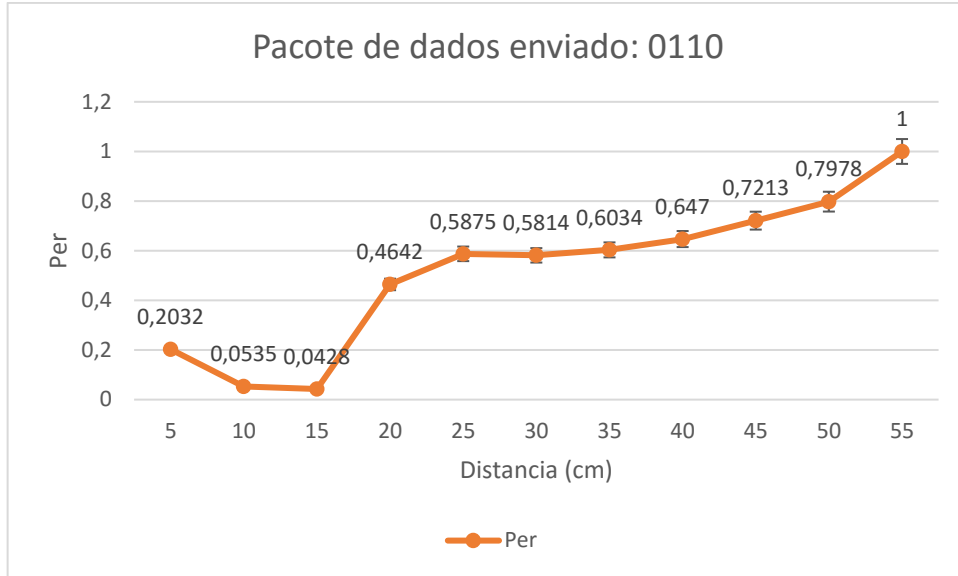


Figura 5.15 -Teste de Distância em ambiente não iluminado

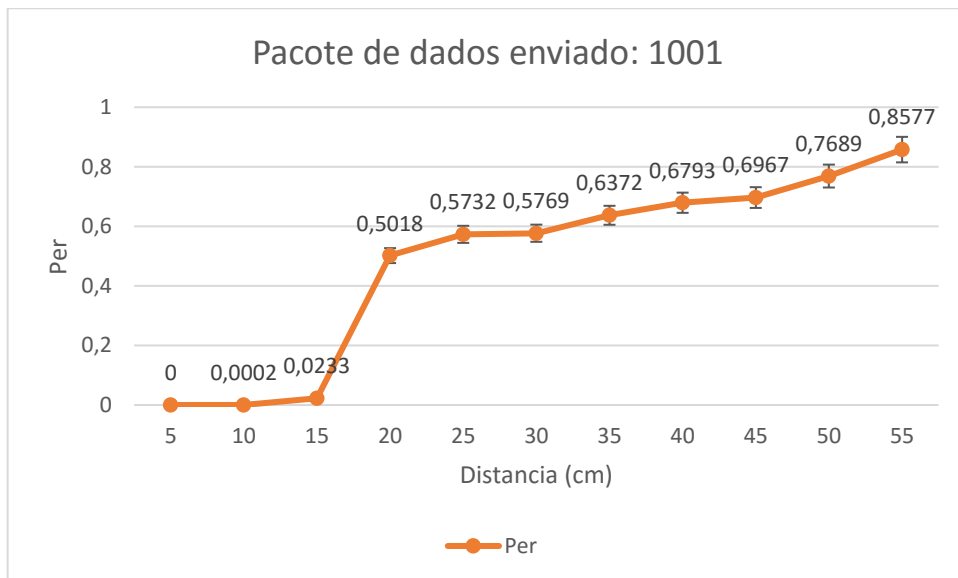


Figura 5.16 -Teste de Distância em ambiente não iluminado

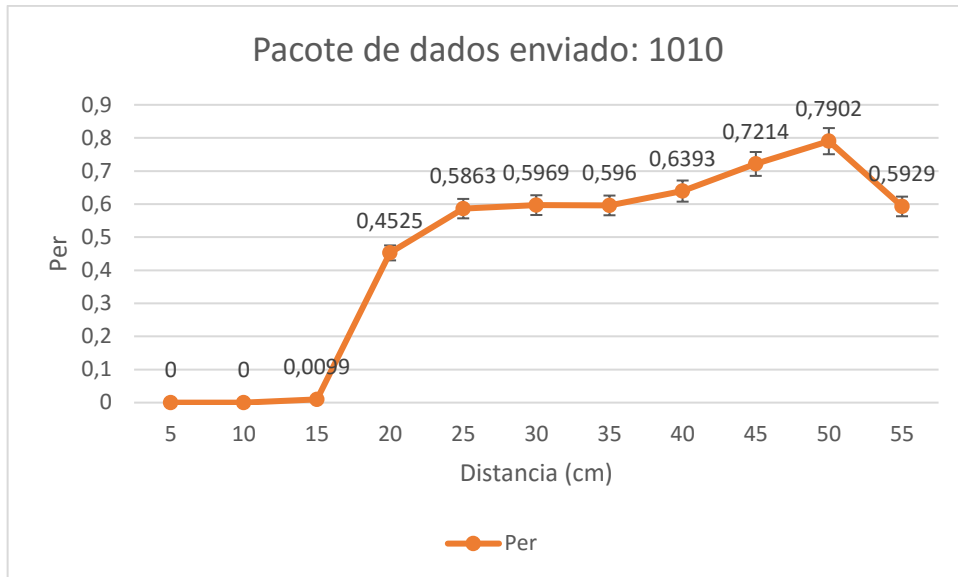


Figura 5.17 7-Teste de Distância em ambiente não iluminado

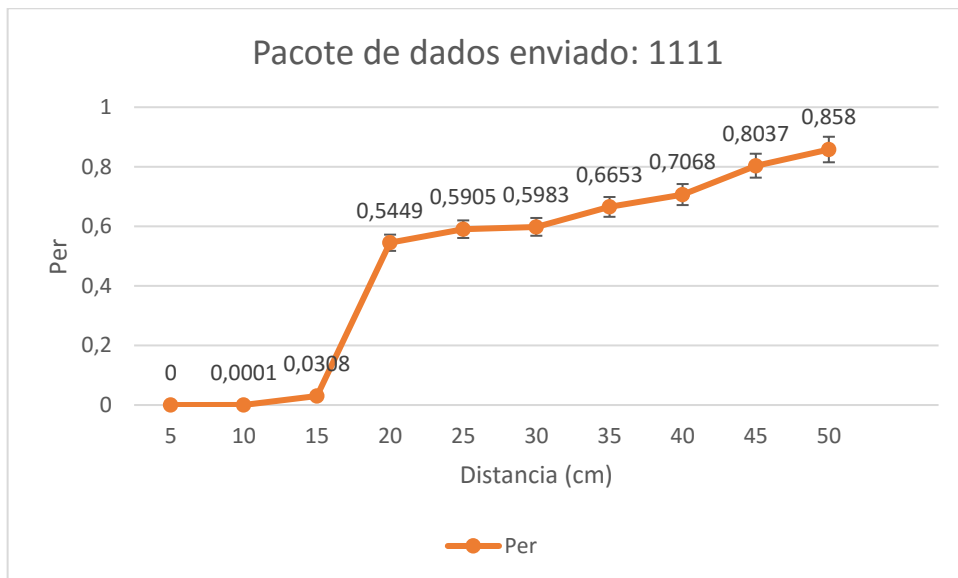


Figura 5.18 -Teste de Distância em ambiente não iluminado

Já no ambiente escuro essa distância foi aumentada para 50 cm, até 55 cm para algumas combinações, sendo esse o máximo de distância alcançado por esse sistema, mas a partir de 50 cm começaram a surgir muitos problemas de sincronismo entre o transmissor e o receptor para alguns conjuntos de dados, já que ele não consegue detectar corretamente se existe ou não iluminação, com isso não detectando o início de uma nova transmissão e perdendo o sincronismo. Isso ocorre já que a densidade de potência do LED que é absorvida pelo fotodiodo é muito pequena. Agora para o teste de frequência, a distância é fixa em 15 cm, os testes são realizados no ambiente escuro com limite de luz definido em 2, e frequência de 500Hz.

Em todos os testes, não somente para os testes de frequência, antes da comunicação serial começar a transmitir as informações sobre os erros, é definido que não existe nenhum

dado a ser enviado para a comunicação serial não influenciar na frequência do sistema. Já que antes de iniciar uma nova transmissão ocorre uma verificação se existe algum dado a ser enviado, com isso a comunicação serial não irá atrasar algum estado durante o envio de símbolo de um pacote por exemplo. Nas figuras 5.19 a 5.24 a seguir temos a PER para cada pacote de dados, variando-se a frequência.

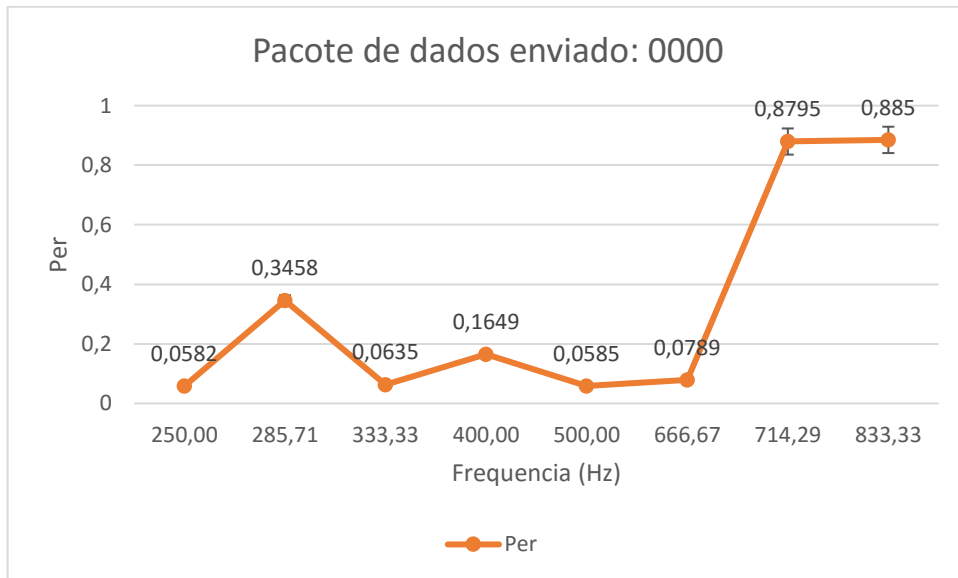


Figura 5.19 -Teste de frequência em ambiente não iluminado

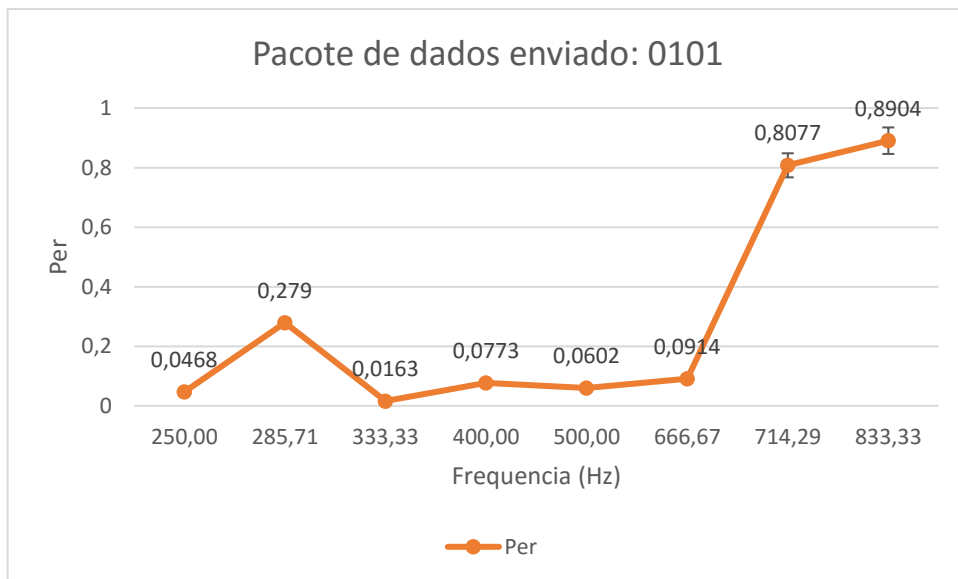


Figura 5.20 -Teste de Frequência em ambiente não iluminado

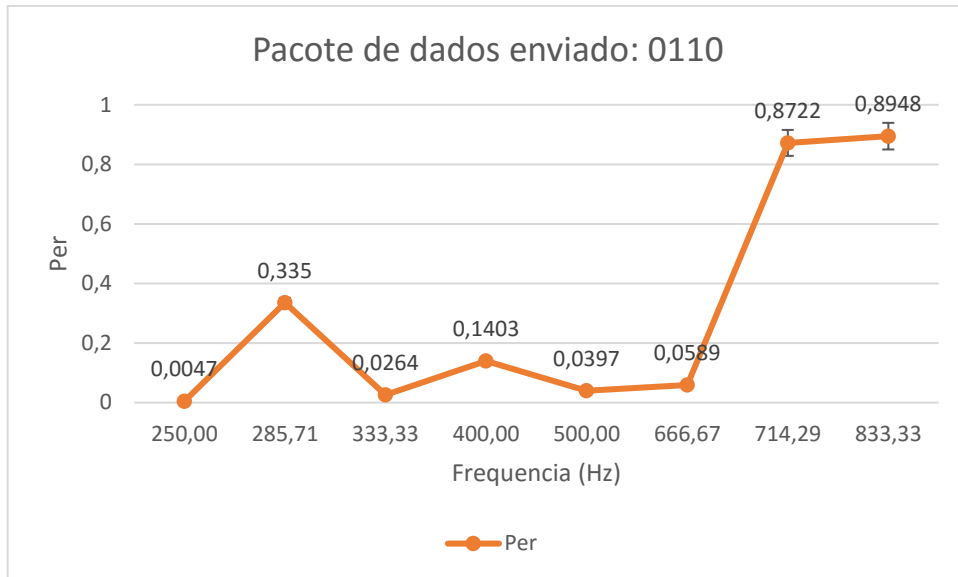


Figura 5.21 -Teste de Freqüência em ambiente não iluminado

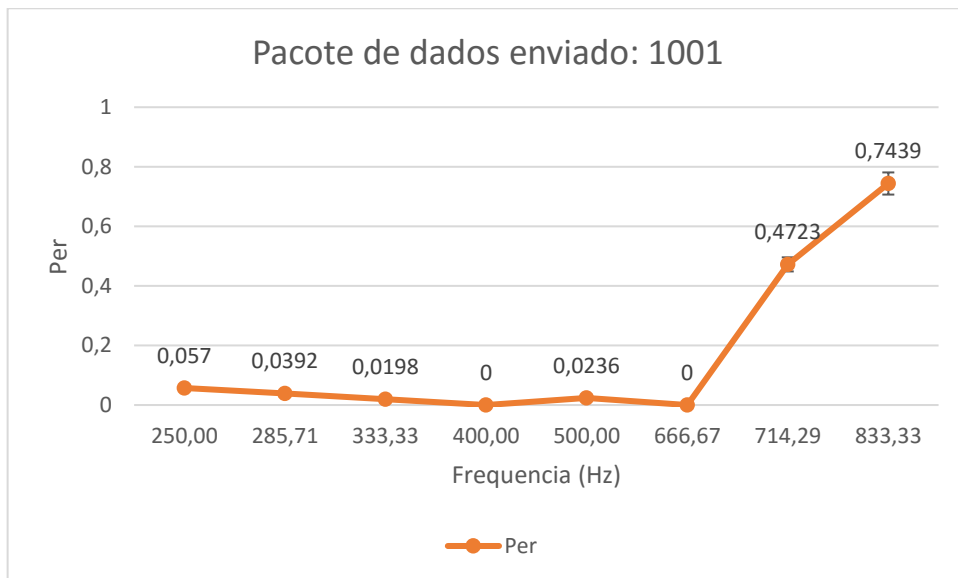


Figura 5.22 -Teste de Freqüência em ambiente não iluminado

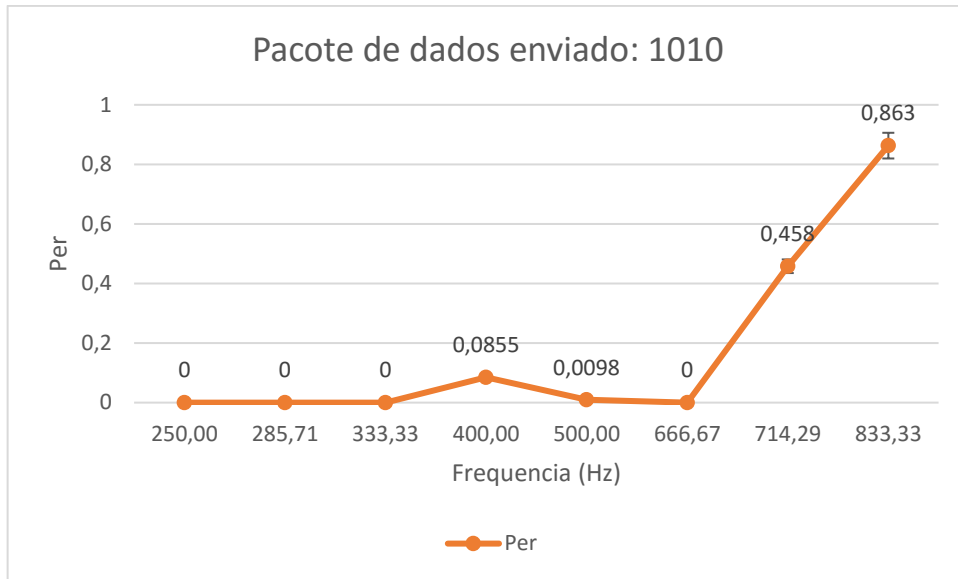


Figura 5.23 8-Teste de Frequência em ambiente não iluminado

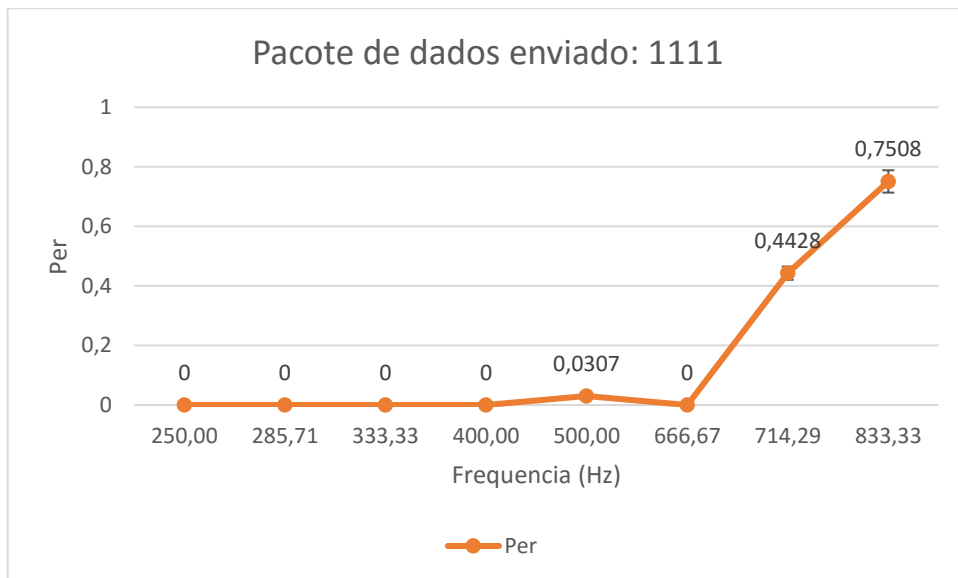


Figura 5.24 9-Teste de Frequência em ambiente não iluminado

Para os testes de ângulo, a distância continua fixa em 15 cm, o pacote de dados com 4 bits e a frequência de 500 Hz. Isso era esperado já que mesmo que o fotodiodo ainda receba em torno de 80% do sinal com esse ângulo, o LED transmite em torno de apenas 30% de luminosidade a partir de 15°. A seguir a PER, os testes de ângulos podem ser vistos nas figuras 5.25 a 5.30.

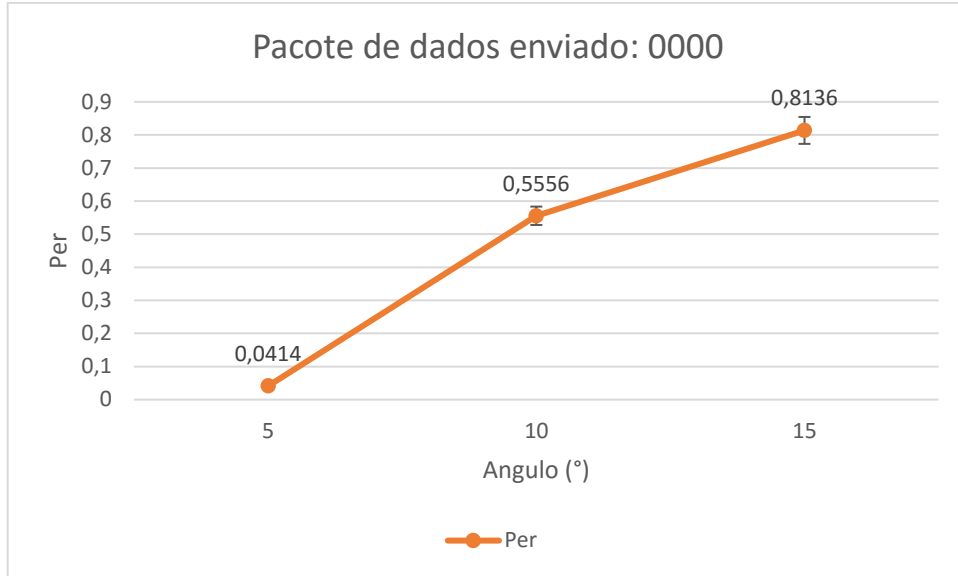


Figura 5.25 -Teste de Angulo de Incidência em ambiente não iluminado

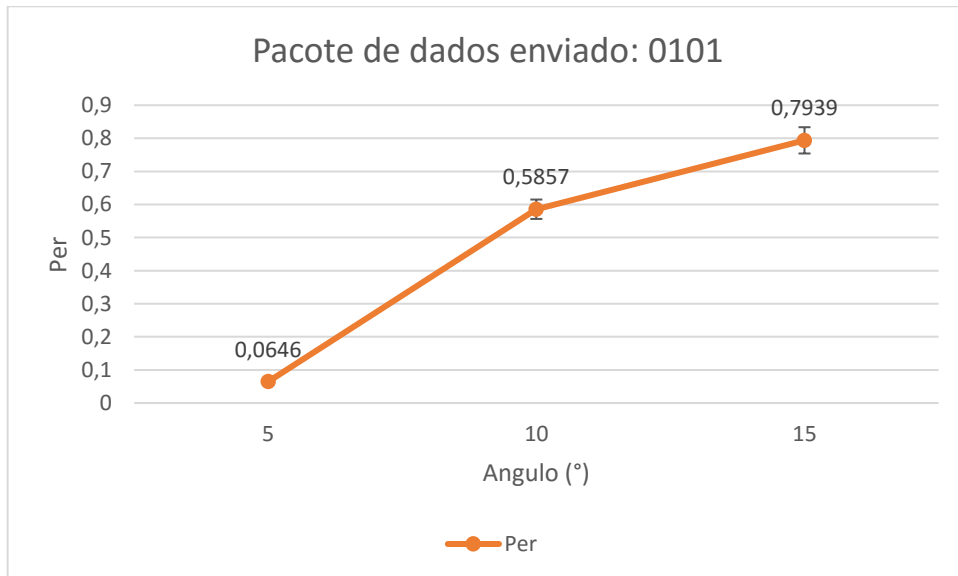


Figura 5.26 -Teste de Angulo de Incidência em ambiente não iluminado

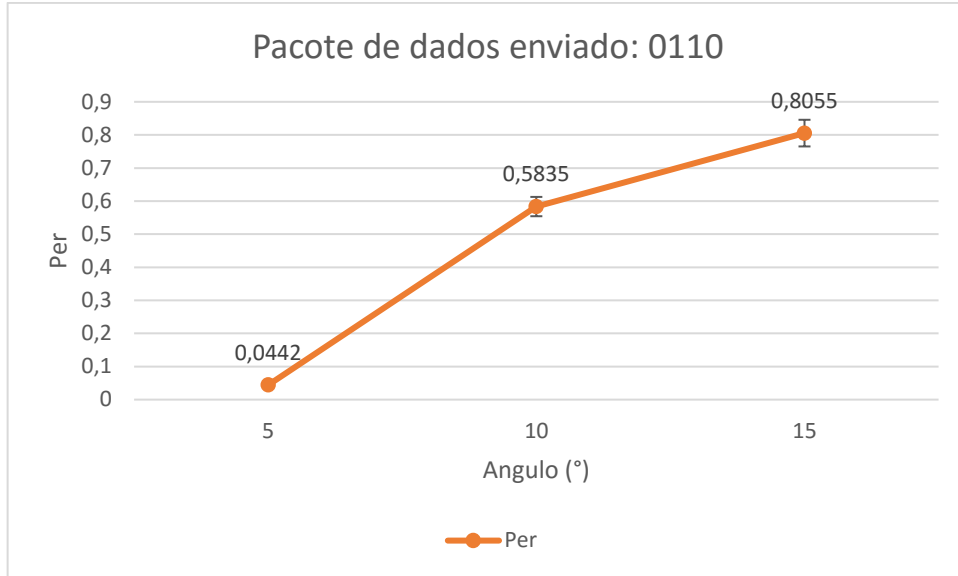


Figura 5.27 -Teste de Angulo de Incidência em ambiente não iluminado

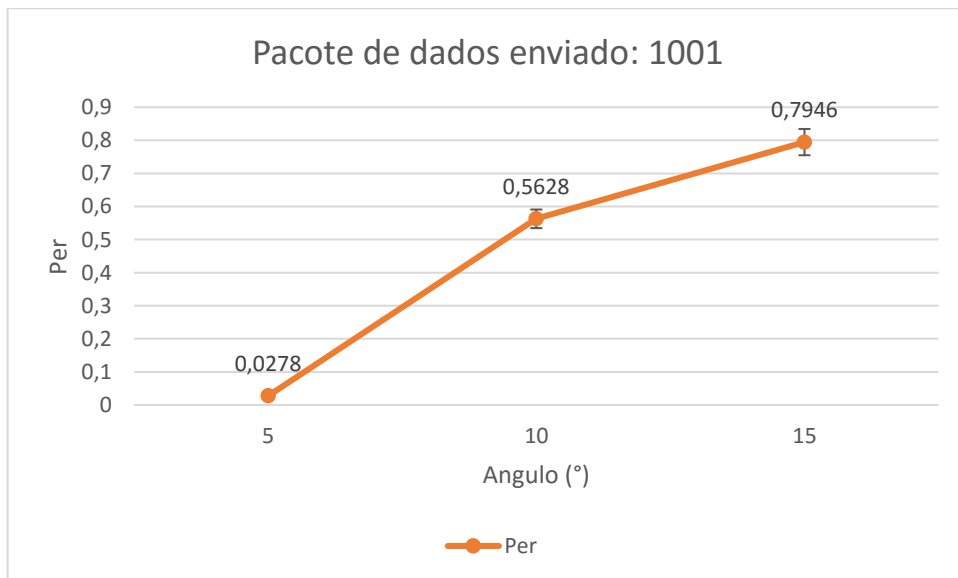


Figura 5.28 -Teste de Angulo de Incidência em ambiente não iluminado

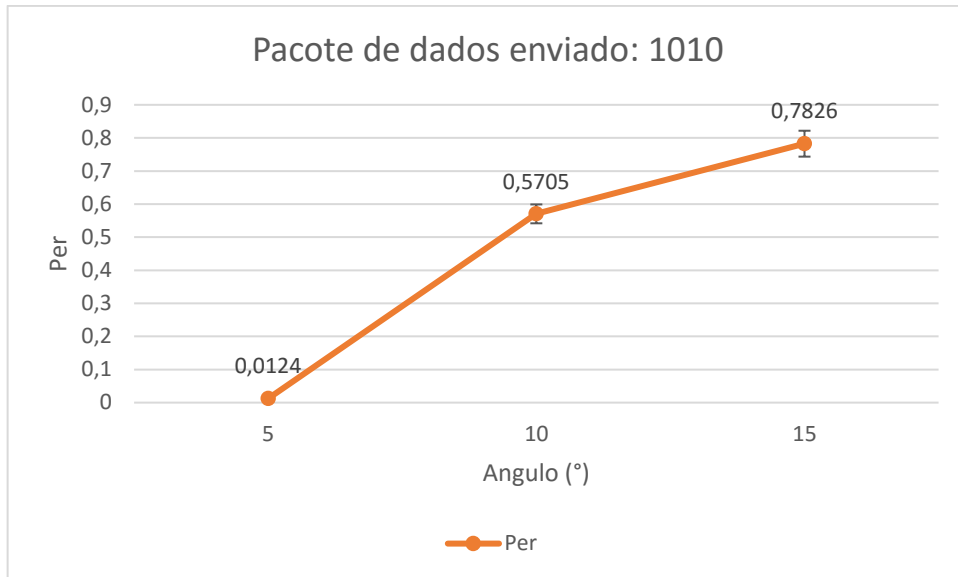


Figura 5.29 -Teste de Angulo de Incidência em ambiente não iluminado

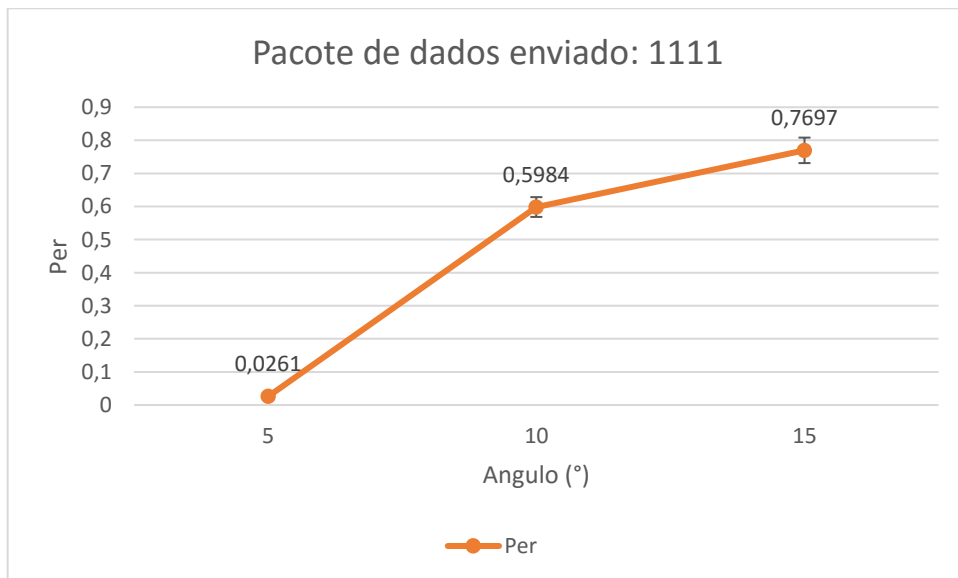


Figura 5.30 -Teste de Angulo de Incidência em ambiente não iluminado

E para o teste de tamanho de pacote, reduziu-se a frequência para 333Hz, pois utilizando a frequência padrão de 500Hz o receptor não conseguia percorrer todas as posições do vetor a tempo e isso gerava erros de sincronismo entre o receptor e o transmissor. Os resultados podem ser vistos nas figuras 5.31 e 5.32.

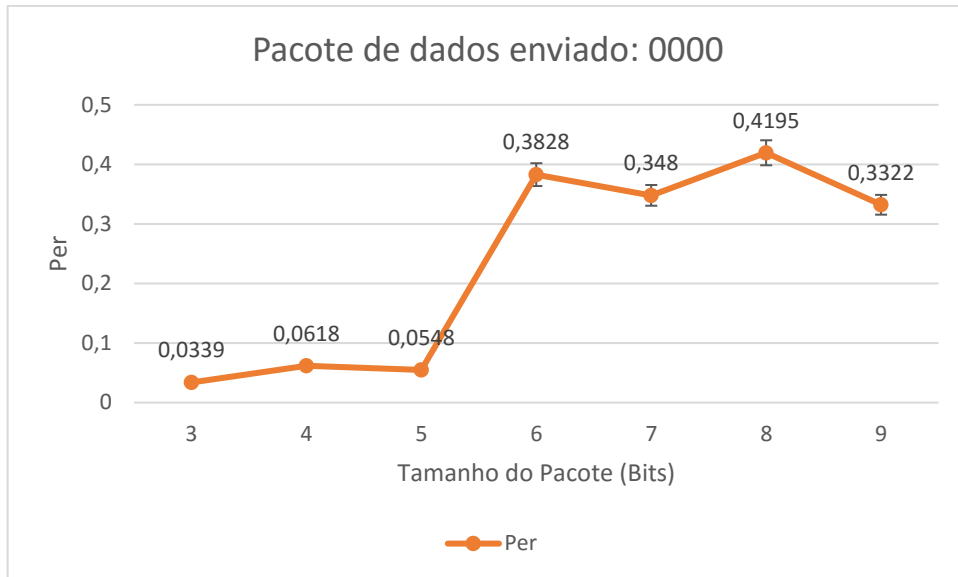


Figura 5.31 10-Teste de tamanho do pacote em ambiente não iluminado

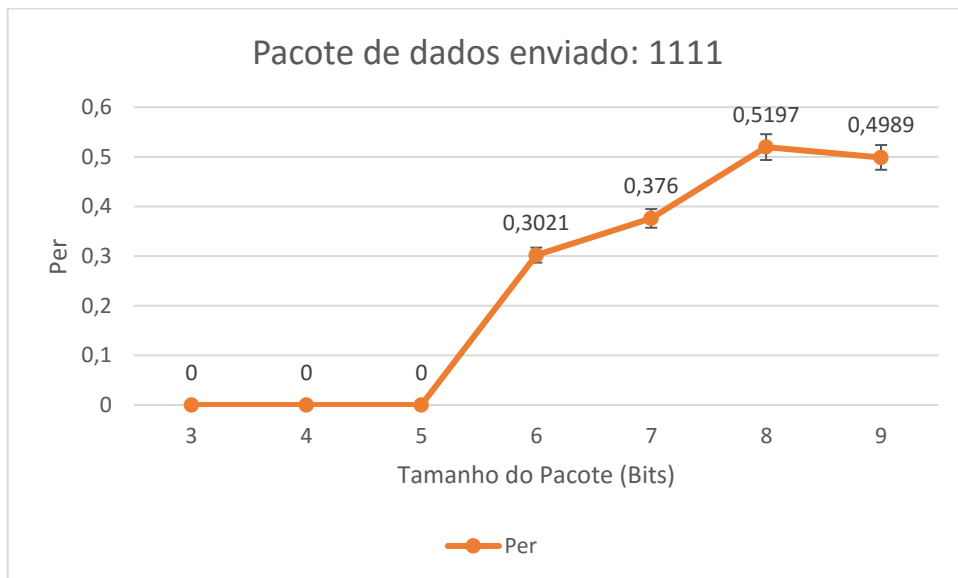


Figura 5.32 -Teste de tamanho do pacote em ambiente não iluminado

Ambos os resultados foram muito próximos, com pequenas exceções como para a frequência de 285Hz que teve um pico dependendo do conteúdo do pacote enviado. Isso pode ser atribuído a interferências de multipercursos que não foram levadas em conta nesses testes. E no geral o sistema padrão escolhido previamente foi utilizando uma frequência de 500Hz, um tamanho de pacote de dados de 4 bits e uma distância de 15 cm. Vimos que o sistema seria mais eficiente se utilizasse um tamanho de pacote de 5 bits e uma frequência de 666,67 Hz.

6. CONCLUSÃO

O objetivo desse trabalho foi implementar um sistema de comunicação VLC e levantar as características do meio utilizado nesse tipo de comunicação, no geral o trabalho cumpriu com as metas estipuladas.

Através desses gráficos apresentados e através dos demais testes realizados anteriormente foram definidas as escolhas de projeto, sendo no geral uma primeira implementação que deve ser aprimorada, mas que já mostra resultados e caminhos a serem seguidos, como por exemplo o limite no ângulo de incidência do LED.

Ocorreram alguns erros no decorrer deste trabalho, que por serem aceitáveis e por falta de tempo continuaram assim, como a melhoria da função de calibração que teve que ser deixada de lado por não ter tempo para realizar todos os testes novamente, e pelo uso da PER ao invés da BER, já que todos os testes foram realizados utilizando-se a PER e optou-se por não realizar todos os testes novamente para a BER pela demanda de tempo.

No entanto, como foi utilizado apenas um LED de baixa potência, não foi possível verificar outros efeitos importantes como a reflexão, e a própria implementação ficou muito dependente do timer do micro controlador, que terá problemas de sincronização para frequências de operação mais elevadas.

6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Trabalhos futuros podem complementar ainda mais o sistema que foi desenvolvido. Aprimorar a função de calibração do nível de luminosidade considerado nível baixo e alto, lendo previamente o nível do ambiente. Com isso não é necessário o usuário entrar um valor inicial, e o sistema se tornaria mais robusto, pois estaria sempre com o mesmo offset a partir da luminosidade do ambiente durante o uso. Realizar mais de uma leitura do valor de tensão no fotodiodo em cada ciclo, com isso poderíamos conferir se o tempo de chaveamento entre cada símbolo recebido durante a recepção do pacote está correto ou se o problema foi na transmissão e não sincronismo. Utilizar alguma técnica para detecção ou correção de erros, diminuindo assim a taxa de erros, e além disso utilizar mais de um LED para tentar alcançar uma distância maior.

REFERENCIAS

- Dantas, M. **Tecnologias de redes de comunicação e computadores**. Tradução . Rio de Janeiro (RJ): Axcel Books, 2002.
- Boylestad, R.Nashelsky, L. **Dispositivos eletrônicos e teoria de circuitos**. Tradução . São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2005.
- Haykin, Simon. **Digital Communications**, John Wiley & Sons, 4th edition, 2007.
- Won, Eun Tae; Shin, Dongjae; Jung, D.K. **Visible Light Communication: Tutorial**, [S.I.], 2008.
- Rappaport, T. **Comunicações sem fio**. Tradução . São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2009.
- Tanenbaum, A.Wetherall, D. **Redes de computadores**. Tradução . São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2011.
- Souza, Uilian Lucas de; Pereira, Thiago Ramos. **Fotodiodos e Fototransistores**. [S.I.], 2012.
- Souza, Jhonathan Junio de; Fonseca, Zito Palhano da; Stevan Junior, Sergio Luiz. **Projeto de um sistema de comunicação por luz visível (VLC) baseado em iluminação LED**. [S.I.], 2013.
- Sevincer, Abdullah; Bhattarai, Aashish; Bilgi, Mehmet; Yuksel, Murat; Pala, Nezh. **LIGHTNETs: Smart LIGHTing and Mobile Optical Wireless NETWORKs – A Survey**. [S.I.], 2013.
- Penttinen, Jyrkit T.J. **The telecommunications Handbook: Engineering Guidelines for Fixed, Mobile and Satellite System**. [S.I.], 2015.
- Wang, Qing; Gnawali Omprakash; Yin, Shengrong; Giustiniano, Domenico. **Demo: OpenVLC1.0 Platform for Research in Visible Light Communication Networks**. [S.I.], 2015.
- Giustiniano, Domenico; Wang, Qing. **OpenVLC, an Open-Source Platform for Internet of Light**. [S.I.], 2015.
- Wang, Qing; Donno, Danilo de; Giustiniano, Domenico. **Demonstration Abstract: Research Platform for Visible Light Communication and Sensing Systems**. [S.I.], 2016.
- Heydariaan, Milad; Yin, Shengrong; Gnawali, Omprakash; Puccinelli, Daniele; Giustiniano, Domenico. **Embedded Visible Light Communication: Link Measurements and Interpretation**. [S.I.], 2016.

APÊNDICES

APÊNDICE A – Código fsm_1_microseconds_final

```

#include "TimerOne.h"
#define LIMITE_LUZ 30 //valor entre 0 e 1023 para separar entre nivel alto e baixa
#define TAMANHO_DADO 4 //tamanho do pacote
#define TAMANHO_PACOTE (2*TAMANHO_DADO)
#define TEMPO 2000 //indica o tempo em us
#define PIN_LED 3

int      limite_luz=30,media=0,repete=0,umBit=0,enviados=0,total=0,certos=0,errados=0;
//CALIBRAÇÃO, adicionei media e limite_luz //contador do laço do transmissor de não enviar
dados
unsigned long t1,t2,t1_inicial,t2_inicial;
volatile int stateT=0,stateR=0;
volatile int flag_envio=1;
volatile int countT,countR;
int pacoteT[TAMANHO_PACOTE];
int dadoT[TAMANHO_DADO]={0,1,1,0};
int pacoteR[TAMANHO_PACOTE];
int dadoR[TAMANHO_DADO];

void registra(){
  int conta=0;
  noInterrupts();
  total++;
  flag_envio=0;
// interrupts();
  for(int i=0;i<TAMANHO_DADO;i++){
    if(dadoR[i]==dadoT[i]){
      // noInterrupts();
      conta++;
      // interrupts();
    }
  }
  if(conta==TAMANHO_DADO){
    //noInterrupts();
    certos++;
    //interrupts();
  }else if(conta==(TAMANHO_DADO-1)){
    //noInterrupts();
    umBit++;
    //interrupts();
  }else{
    // noInterrupts();
    errados++;
  }
}

```

```

    // interrupts();
  }
  if((total==1000)or(enviados==1000)){
  Serial.print("T ");
  Serial.print(enviados);
  Serial.print(" R ");
  Serial.print(total);
  Serial.print(" C ");
  Serial.print(certos);
  Serial.print(" B ");
  Serial.print(umBit);
  Serial.print(" E ");
  Serial.print(errados);
  Serial.print("\n");
  enviados=0;
  total=0;
  certos=0;
  umBit=0;
  errados=0;
  }
  //noInterrupts();
  flag_envio=1;
  interrupts();
}

void manchesterR(){
  int j=0;
  for(int i=0;i<TAMANHO_PACOTE;i=i+2){
    dadoR[j]=pacoteR[i];
    //Serial.print(dadoR[j]);
    j++;
  }
  //Serial.print("\n");
}

void manchesterT(){
  int j=0;
  for(int i=0; i<TAMANHO_PACOTE; i++){
    if(i%2==0){
      pacoteT[i]=dadoT[j];
    }else{
      pacoteT[i]=not(dadoT[j]);
    }
    j++;
  }
}
}

```

```

void transmissor(){
  switch(stateT){
    case 1:          // envia 0 do bit 1, se tiver dado pra enviar vai pro 2, se não volta pro
1(Default que manda 1 do bit 1)
    digitalWrite(PIN_LED,LOW);
    if((repete==1)and(flag_envio)){
      noInterrupts();
      stateT=2;
      repete=0;
      interrupts();
      break;
    }else{
      noInterrupts();
      stateT=0;
      repete++;
      interrupts();
      break;
    }

    case 2:          //envia 0, do bit 0
    digitalWrite(PIN_LED,LOW);
    noInterrupts();
    stateT=3;
    interrupts();
    break;

    case 3:          //envia 1, do bit 0, e codifica o dado
    digitalWrite(PIN_LED,HIGH);
    manchesterT();
    noInterrupts();
    countT=0;
    stateT=4;
    interrupts();
    break;

    case 4:          //envio do dado, apos retorna para o default
    digitalWrite(PIN_LED,pacoteT[countT]);
    noInterrupts();
    countT++;
    interrupts();
    if(countT>=TAMANHO_PACOTE){
      noInterrupts();
      stateT=0;
      enviados++;
      interrupts();
    }
    break;
  }
}

```

```

    default:          //case 0, envia 1 do bit 1
    digitalWrite(PIN_LED,HIGH);
    noInterrupts();
    stateT=1;
    interrupts();
    break;
  }
}

int recebeSimbolo(){
  int x;
  digitalWrite(2,HIGH);
  x=analogRead(A0);
  x=x+analogRead(A0);
  // dado=dado+analogRead(A0);
  digitalWrite(2,LOW);
  // dado=dado/2;
  if(x>=2*limite_luz)
    x=1;
  else
    x=0;
  return x;
}

int recebe(){
  int x;
  digitalWrite(2,HIGH);
  x=analogRead(A0);
  x=x+analogRead(A0);
  x=x>>1;
  return x;
}

void setup() {
  Serial.begin(230400);
  pinMode(2,OUTPUT);
  pinMode(PIN_LED,OUTPUT);
  Timer1.initialize(0);
  Timer1.setPeriod(TEMPO);
  Timer1.attachInterrupt(transmissor);
}

void loop() {
  switch(stateR){
    case 1:          //recebe o 0 do bit 1
  //  Serial.println("B");

```

```

while(1){
  if(recebeSimbolo()==0){
    // limite_luz=(LIMITE_LUZ+((media+recebe())>>1)); //CALIBRAÇÃO, define o limite
de luz como a media entre o nivel alto no case 0 e nivel baixo no case 1 e soma com o "ganho"
escolhido
    //Serial.println(limite_luz);
    t1_inicial=micros();
    break;
  }
}
noInterrupts();
stateR=2;
interrupts();
break;

case 2:      //recebe o 1 do bit 1
//Serial.println("C");
while(1){
  if(recebeSimbolo()){
    t1=micros()-t1_inicial;
    break;
  }
}
noInterrupts();
stateR=3;
interrupts();
break;

case 3:      //recebe o 0 do bit 0
//Serial.println("D");
while(1){
  if(recebeSimbolo()==0){
    t2_inicial=micros();
    break;
  }
}
noInterrupts();
stateR=4;
interrupts();
break;

case 4:
//Serial.println("E"); //recebe o 1 do bit 0
while(1){
  if(recebeSimbolo()){
    t2=micros()-t2_inicial;
    break;
  }
}

```

```

    }
  }
  if(t2>(1.5*t1)){
  noInterrupts();
  stateR=5;
  countR=0;
  interrupts();
  break;
  }else{
  noInterrupts();
  stateR=0;
  interrupts();
  break;
  }

  case 5:
  //Serial.println("F");
  delayMicroseconds(t1);
  pacoteR[countR]=recebeSimbolo();
  noInterrupts();
  countR++;
  interrupts();
  if(countR>=TAMANHO_PACOTE){
    manchesterR();
    registra();
    noInterrupts();
    stateR=0;
    interrupts();
  }
  break;

  default:          //aguarda o simbolo 1 do bit 1
  //Serial.println("A");
  while(1){
    if(recebeSimbolo()){
  //  media=recebe();  //CALIBRAÇÃO
    break;
    }
  }
  noInterrupts();
  stateR=1;
  t1=0;
  t2=0;
  interrupts();
  break;
}
}

```