

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETRÔNICA
CURSO DE ENGENHARIA ELETRÔNICA

VINICIUS JOSÉ ALMEIDA DE SOUZA

DESENVOLVIMENTO DE UM TRANSMISSOR E UM RECEPTOR PLC

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO 2

CAMPO MOURÃO
2017

VINICIUS JOSÉ ALMEIDA DE SOUZA

DESENVOLVIMENTO DE UM TRANSMISSOR E UM RECEPTOR PLC

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2 - TCC2, do curso superior de Engenharia Eletrônica do Departamento Acadêmico de Eletrônica – DAELN da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel.

Orientador: Prof. Dr. Jakson Paulo Bonaldo

CAMPO MOURÃO

2017

TERMO DE APROVAÇÃO
DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO INTITULADO

DESENVOLVIMENTO DE UM TRANSMISSOR E UM RECEPTOR

PLC

por

Vinicius José Almeida de Souza

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no dia 22 de Novembro de 2017 ao Curso Superior de Engenharia Eletrônica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Campo Mourão. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. Dr. Marcio Rodrigues da Cunha
(UTFPR)

Prof. Me. Reginaldo Nunes de Souza
(UTFPR)

Prof. Dr. Jakson Paulo Bonaldo
(UTFPR)
Orientador

A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso

Dedico este trabalho aos meus pais, sem os quais
jamais teria chegado onde cheguei.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente ao meu orientador Prof. Dr. Jakson Paulo Bonaldo por todo seu suporte e paciência durante a elaboração deste trabalho.

Agradeço aos meus amigos, que me ajudaram a seguir a diante e sempre estiveram ao meu lado.

Agradeço também a minha família que nunca deixou faltar nada, por fim, a todos que me ajudaram a chegar aqui, meu grande e sincero obrigado.

"não adianta voltar para ontem, porque eu era uma pessoa diferente." (Lewis Carroll)

RESUMO

DE SOUZA, Vinicius José Almeida. **Desenvolvimento de um transmissor e um receptor PLC**. 2017. 49 f. Trabalho de conclusão de curso (Curso Superior de Engenharia Eletrônica), Departamento de Eletrônica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Campo Mourão, 2017.

A proposta deste trabalho é desenvolver um transmissor e um receptor PLC. O transmissor é baseado em um modulador do tipo FSK realizado usando osciladores e filtros passa-faixa passivos. O sinal modulado é aplicado na rede elétrica através de um circuito de acoplamento com característica de filtro passa-altas. Por sua vez, o receptor é acoplado à rede elétrica através de um outro filtro do tipo passa-altas que remove o sinal em 60 Hz e aplica o sinal modulado na entrada do circuito demodulador. A demodulação é baseada na conversão da onda senoidal em uma onda quadrada, que é processada pelo microcontrolador AT89S52. A validação dos circuitos de modulação e demodulação é realizada por meio de resultados experimentais colhidos de um protótipo. Os acoplamentos e circuitos propostos são testados através de um transformador abaixador simulando a rede elétrica, assim como é feito o teste com carga geradora de ruído.

Palavras Chave: Modulação FSK, Transceptor PLC, Filtro de Acoplamento.

ABSTRACT

DE SOUZA, Vinicius José Almeida. **Development of a PLC transmitter and receiver**. 2017. 49 f. Trabalho de conclusão de curso (Curso Superior de Engenharia Eletrônica), Departamento de Eletrônica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Campo Mourão, 2017.

This work proposes to develop a PLC transmitter and receiver. The transmitter is based on a FSK modulator accomplished utilizing oscillators and passive band-pass filters. The modulated signal is applied in the power line by a coupling circuit with high-pass filter characteristics. On the other hand, the receiver is coupled to the power line by another high-pass filter which removes the 60 Hz signal and applies the modulated signal in the input of the demodulator circuit. The demodulation is based on the sinusoidal wave conversion to a square wave, which is then processed by the AT89S52. The modulation and demodulation circuits validation is accomplished by experimental results collected from a prototype. The couplers and proposed circuits are tested by a lowering transformer which simulates the power line, as well as it is done the test with a noise generating load.

Keywords: FSK Modulation, PLC Transceiver, Coupling Filter

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Sinal modulado em frequência por chaveamento binário	9
Figura 2 - Resposta de um filtro passa-baixa ideal	10
Figura 3 - Resposta de um filtro passa-alta ideal	10
Figura 4 - Resposta de um filtro passa-faixa ideal	11
Figura 5 - Resposta de um filtro rejeita-faixa ideal	11
Figura 6 - Acoplamento da rede elétrica	13
Figura 7 - Esquema dos pinos de um AT89S52 de 40 pinos	13
Figura 8 - Esquema dos pinos de um SN74HC4066.....	14
Figura 9 - Transmissor	15
Figura 10 - Receptor	16
Figura 11 - Circuito oscilador de 159 kHz com C.I 555 e filtro de saída	16
Figura 12 - Resposta em frequência do filtro RLC	17
Figura 13 - Circuito oscilador de 96 kHz com C.I 555 e filtro de saída.....	18
Figura 14 - Circuito seletor de frequência	18
Figura 15 - Divisor de Tensão	19
Figura 16 - Amplificador e filtro.....	20
Figura 17 - Modulador de frequência	20
Figura 18 - Demodulador de frequência.....	21
Figura 19 - Fluxograma	22
Figura 20 - Acoplamento de rede.....	23
Figura 21 - Resposta em frequência do acoplamento com indutor de 1 mH e 220 mH	23
Figura 22 - Onda quadrada de saída do C.I. 555	25
Figura 23 - Onda quadrada filtrada	25
Figura 24 - Sinal modulado com nível CC.....	26
Figura 25 - Sinal modulado	26
Figura 26 - Sinal de saída do comparador	27
Figura 27 - Sinal de entrada do microcontrolador	27
Figura 28 - Sinais modulado e demodulado.....	28
Figura 29 - Circuito de teste do acoplamento.....	28
Figura 30 - Sinal medido na rede entre os pontos rede_L e rede_N quando aplicado sinal de 96 kHz: (a) Ciclo completo da tensão da rede; (b) Ampliação da área pontilhada.....	29
Figura 31 - FFT da rede com sinal de 96 kHz	29
Figura 32 - FFT da rede com sinal de 159 kHz	30
Figura 33 - Sinal de 159 kHz (Sinal_Modulado_OUT)	30
Figura 34 - Sinal de 96 kHz (Sinal_Modulado_OUT)	31
Figura 35 - Acoplamentos	31
Figura 36 - Sinal na entrada do primeiro acoplamento (Sinal_Modulado_IN)	32
Figura 37 - Sinal entre os dois acoplamentos (Sinal_Modulado_Inter)	32
Figura 38 - Sinal na saída do segundo acoplamento (Sinal_Modulado_OUT).....	32

Figura 39 - Sinal modulado e demodulado com acoplamento	33
Figura 40 - Sistema completo.....	34
Figura 41 - Sinal de entrada do acoplamento com rede (Sinal_Modulado_IN)	34
Figura 42 - Sinal medido na rede entre os pontos rede_L e rede_N: (a) Ciclo completo da tensão da rede; (b) Ampliação da área pontilhada	34
Figura 43 - Sinal na saída do acoplamento com rede (Sinal_Modulado_OUT).....	35
Figura 44 - Sinal modulado e demodulado com acoplamento e rede	35
Figura 45 - Sistema completo com carga	36
Figura 46 - Entrada do acoplamento do modulador com carga conectada à rede (Sistema_Modulado_IN).....	37
Figura 47 - Sinal medido na rede entre os pontos rede_L e rede_N com carga: (a) Ciclo completo da tensão da rede; (b) Ampliação da área pontilhada	37
Figura 48 - Saída do acoplamento do demodulador com carga conectada à rede (Sistema_Modulado_OUT).....	37
Figura 49 - FFT da onda de 159 kHz com a carga desligada	38
Figura 50 - FFT da onda de 159 kHz com a carga ligada	38
Figura 51 - Sinais modulado e demodulado	39

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Lista de acoplamentos	12
--	----

LISTA DE ACRÔNIMOS E ABREVIATURAS

BFSK	Binary Frequency-Shift Keying
CC	Corrente Continua
CI	Circuito Integrado
FFT	Fast Fourier Transform
FSK	Frequency-Shift Keying
GPIO	General Purpose Input and Output
PLC	Power Line Communication
UART	Universal Asynchronous Receiver/Transmitter

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	6
1.1 DELIMITAÇÃO DO TEMA	6
1.2 PROBLEMAS E PREMISSAS.....	7
1.3 OBJETIVOS	7
1.3.1 Objetivo Geral	7
1.3.2 Objetivos Específicos.....	8
1.4 JUSTIFICATIVA.....	8
1.5 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	8
1.6 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	9
1.6.1 Modulação FSK.....	9
1.6.2 Filtros	9
1.6.3 Acoplamento de rede	11
1.6.4 Microcontrolador AT89S52	13
1.6.5 C.I. 74HC4066	14
2 MATERIAIS E MÉTODOS	15
2.1 MATERIAIS.....	15
2.2 MÉTODOS.....	15
2.2.1 Modulador FSK.....	16
2.2.2 Demodulador FSK.....	21
2.2.3 Acoplamento	23
3 RESULTADOS E DISCUSSÕES	24
3.1 TESTE 1: MODULADOR E DEMODULADOR.....	24
3.2 TESTE 2: CIRCUITO DE ACOPLAMENTO	28
3.3 TESTE 3: MODULADOR E DEMODULADOR COM ACOPLAMENTO	31
3.4 TESTE 4: SISTEMA COMPLETO.....	33
3.5 TESTE 5: SISTEMA COMPLETO COM CARGA CONECTADA À REDE	36
3.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	39
REFERENCIAS	40
APÊNDICES	41

1 INTRODUÇÃO

Para toda comunicação é necessário haver um canal (MADHOW, 2008), e ao se tratar de dispositivos eletrônicos, normalmente são usados cabos para realizar a conexão, que geram um custo extra ao sistema de comunicação. Existe também a possibilidade de transmissão sem fio, mas isso gera uma maior complexidade que se reverte em custo. Ainda assim, existem ambientes que não suportam tal comunicação devido a ruídos ou interferência entre equipamentos, como em hospitais onde há restrição para uso de equipamentos sem fio.

First of all, use of wireless equipments is restrained at hospitals. The most important factor to consider is that the risk of electromagnetic waves resulting from transmission and reception of various equipments interfering with each other's operation, leading to malfunctions, is steadily increasing. Because correct operation of wireless networks has direct consequence on precious life of patients, it is crucial that the wireless networks are not paralyzed at all times, and that they function properly. (AHN et al., 2008, p. 3)¹

Dessa forma, a utilização de Comunicação via Rede Elétrica do inglês *Power Line Communication* (PLC), se torna uma alternativa viável. PLC é a tecnologia que utiliza a própria rede elétrica já existente como um canal para transmissão e recepção de dados (FERREIRA, 2005). Dessa forma, é possível baixar o custo com o canal e ter vários dispositivos se comunicando sem necessidade de cabeamento adicional.

1.1 DELIMITAÇÃO DO TEMA

O dispositivo desenvolvido nesse trabalho tem a utilização direcionada a residências e estabelecimentos com restrição a redes sem fio, podendo ser utilizado em qualquer espaço, desde que a rede elétrica não tenha excesso de ruído em frequências próximas às frequências de modulação.

¹ Primeiramente, o uso de equipamentos sem fio é restringido em hospitais. O fator mais importante a se considerar é que o risco de ondas eletromagnéticas resultantes da transmissão e recepção de vários equipamentos interferindo com as operações uns dos outros, levando a mal funcionamento, aumenta constantemente. Pois a correta operação de redes sem fio tem consequências diretas nas preciosas vidas dos pacientes, é crucial que as redes sem fio não estejam paralisadas a todo o tempo, e que funcionem apropriadamente. (Tradução nossa)

1.2 PROBLEMAS E PREMISSAS

Este trabalho foi motivado com base em três pontos essenciais:

1. A restrição do uso de redes sem fio em determinados ambientes.
2. O custo dos cabos para transmissão de dados.
3. A utilização relativamente baixa da tecnologia PLC.

Os dois primeiros pontos estão relacionados, pois um leva ao outro, como alguns ambientes restringem a utilização de redes sem fios, como hospitais por exemplo, normalmente acaba sendo necessária a utilização de cabos para comunicação entre equipamentos, gerando custo adicional, além de nem sempre haver espaço para tal implementação.

O terceiro ponto está voltado ao desenvolvimento e disseminação de conhecimentos e tecnologias, já que a tecnologia PLC apesar de não ser tão recente (FERREIRA, 2005), é pouco conhecida entre os ingressantes de cursos de eletrônica, e poderia ser mais utilizada caso fosse mais divulgada.

O desenvolvimento de um dispositivo de comunicação PLC não é uma tarefa simples, considerando que além de conhecimentos em eletrônica analógica também são necessários conhecimentos em sistemas de comunicações digitais e analógicos, microcontroladores, eletromagnetismo, etc.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

Projetar e implementar um transmissor e um receptor utilizando tecnologia PLC, ou seja, que use a rede elétrica como canal.

1.3.2 Objetivos Específicos

Os principais objetivos deste trabalho são:

- Analisar e implementar o acoplamento do sistema PLC com a rede elétrica.
- Gerar e tratar apropriadamente o sinal de comunicação através de análises e implementação de um modulador e um demodulador.
- Converter os dados digitais em sinal analógico e vice-versa.

1.4 JUSTIFICATIVA

O mundo contemporâneo é extremamente dinâmico e ativo, e nele existem diversos ambientes com diversas limitações, sejam estes ambientes fabris, médicos ou quaisquer outros. Com tamanha variedade, as limitações nestes ambientes não podem impedir que as atividades presentes sejam realizadas.

Estas limitações podem estar relacionadas a ruídos sonoros em ambientes silenciosos, ou ondas eletromagnéticas no caso de hospitais (ABNT, 2010) etc.

Este trabalho é justificado como uma alternativa a tais limitações, e por gerar possíveis reduções de custo com cabos de transmissão.

1.5 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Após o desenvolvimento e implementação do circuito de transmissão e o de recepção, será necessário o estudo e teste do acoplamento de rede visto em (BARBANTE, 2009), que será usado tanto para acoplar o circuito de transmissão quanto para o circuito de recepção à rede elétrica.

Na última etapa do projeto, será feita uma placa com o transmissor e uma com o receptor, onde as duas devem ser mostradas trabalhando em conjunto.

1.6 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

1.6.1 Modulação FSK

Modulação é uma operação de processamento de sinal, onde uma onda portadora tem alguns de seus parâmetros modificados para poder transmitir os dados. A portadora é necessária para transmitir dados por um canal, podendo esses dados serem digitais ou analógicos (HAYKIN; MOHER, 2007).

Dentre algumas das ramificações da modulação de frequência por chaveamento, do inglês *Frequency-Shift Keying* (FSK), está a modulação de frequência por chaveamento binário, do inglês *Binary Frequency-Shift Keying* (BFSK) que é a "forma mais simples de modulação de frequência por chaveamento" (HAYKIN; MOHER, 2007, p.281).

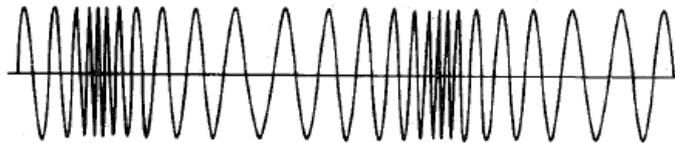


Figura 1 - Sinal modulado em frequência por chaveamento binário
Fonte: Lathi (1998).

Na Figura 1 é possível identificar a alternância entre duas frequências diferentes, uma maior e uma menor, sendo que cada uma dessas frequências representa um símbolo, no caso em estudo zero e um.

1.6.2 Filtros

Como definido de maneira simples por (MUSSOI, 2004) o filtro é um circuito que se comporta "em função da frequência do sinal a ele aplicado, permitindo a passagem de sinais com certas frequências, enquanto suprime sinais com outras frequências".

Os filtros podem ser classificados em três categorias com relação à tecnologia neles empregada: filtros passivos, ativos e digitais. Nos filtros ativos são empregados componentes passivos, e componentes ativos como amplificadores

operacionais para obter a filtragem do sinal. Nos filtros digitais são utilizados sistemas microprocessados e programação como forma de filtrar o sinal. Por fim os filtros passivos são compostos apenas por componentes passivos, ou seja, resistores, capacitores e indutores (MUSSOI, 2004).

Os filtros também podem ser classificados com relação à função que executam, são esses os filtros passa-baixa, passa-alta, passa-faixa e rejeita-faixa. Nos filtros passa-baixa só passarão sinais de tensão e corrente com a frequência abaixo de um determinado limite, sinais com uma frequência superior ao limite serão atenuados.

Nos filtros passa-alta os sinais que passarão serão aqueles com uma frequência acima de um determinado limite, e sinais com um frequência inferior serão atenuados. Nos filtros passa-faixa os sinais que estiverem entre um determinado intervalo de frequência passarão, enquanto sinais fora desse intervalo serão atenuados.

Por fim, no filtro rejeita-faixa os sinais que estiverem fora de um determinado intervalo de frequência passarão, enquanto os que estiverem dentro desse intervalo serão atenuados (MUSSOI, 2004). Os filtros descritos podem ser vistos nas Figuras 2, 3, 4 e 5.

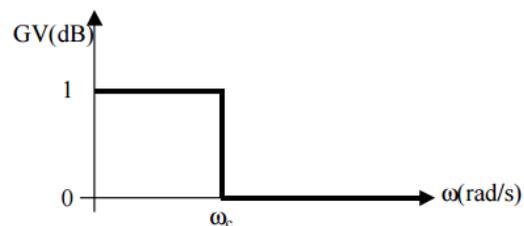


Figura 2 - Resposta de um filtro passa-baixa ideal
Fonte: Mussoi (2004)

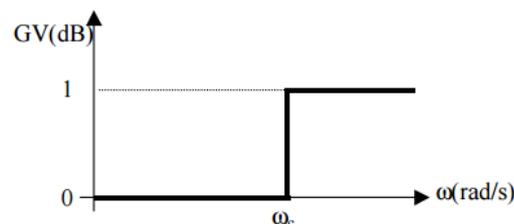


Figura 3 - Resposta de um filtro passa-alta ideal
Fonte: Mussoi (2004)

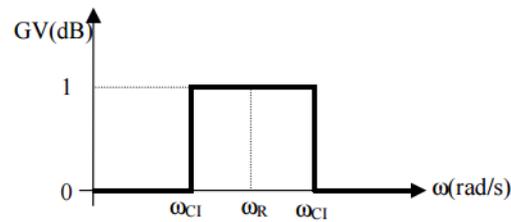


Figura 4 - Resposta de um filtro passa-faixa ideal
Fonte: Mussoi (2004)

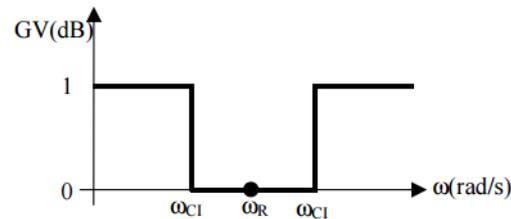


Figura 5 - Resposta de um filtro rejeita-faixa ideal
Fonte: Mussoi (2004)

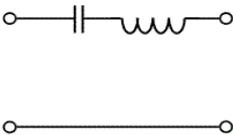
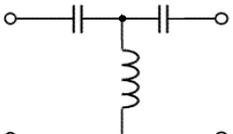
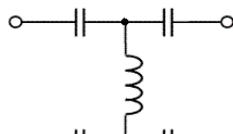
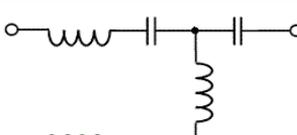
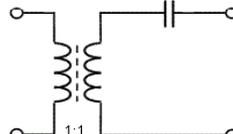
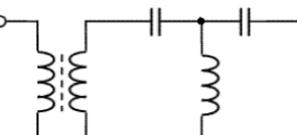
1.6.3 Acoplamento de rede

O acoplamento adotado neste trabalho do tipo isolado, no qual a isolação se dá pelo uso de capacitores em série. O circuito de acoplamento é composto por resistores, capacitores e indutores e tem comportamento de um filtro passa-altas.

Como o acoplamento direto não possui isolamento da rede, isso o torna susceptível a transientes causados por descargas elétricas ou flutuações da rede, uma maneira de contornar esse problema é o uso de capacitores como forma de isolamento (BARBANTE, 2009).

Existem vários tipos possíveis de acoplamentos de rede que podem ser escolhidos, cada um com suas próprias vantagens e desvantagens, na Tabela 1 podem ser vistos alguns dos acoplamentos que podem ser usados.

Tabela 1 - Lista de acoplamentos

ACOPLAMENTO	PONTO FORTE	PONTO FRACO
 <p>Direto LC</p>	Menor custo possível, simplicidade	Possibilidade de choque
 <p>Direto em T</p>	Baixo custo, melhor filtragem	Possibilidade de choque
 <p>Isolado capacitivo simétrico</p>	Boa filtragem e isolamento, custo médio	Resistência de inserção limita distância da transmissão, custo médio
 <p>Isolado com filtragem dupla em π e resistência reduzida</p>	Boa filtragem e isolamento, custo médio	Indutores em série diminuem a resistência de inserção
 <p>Isolado com transformador</p>	Bom isolamento	Sensível aos valores dos componentes e tolerâncias, custo elevado
 <p>Isolado com transformador em T</p>	Isolamento, boa filtragem	Custo mais alto entre os modelos estudados

Fonte: Barbante (2009)

O modelo de acoplamento que será utilizado será do "tipo isolado e capacitivo com indutores para reduzir a resistência série dos capacitores" (BARBANTE, 2009, p. 37). O acoplamento também será simétrico de modo a permitir uma inversão de fase e neutro sem maiores complicações. Na Figura 6 pode ser visto o acoplamento que será utilizado neste trabalho.

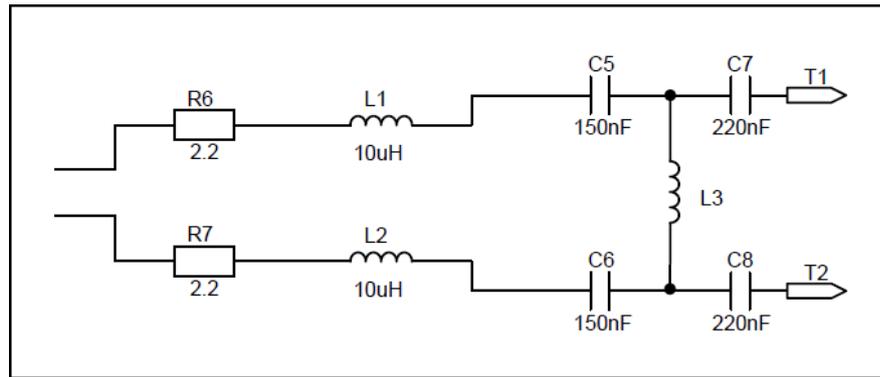


Figura 6 - Acoplamento da rede elétrica
Fonte: Barbante (2009)

1.6.4 Microcontrolador AT89S52

O AT89S52 da Atmel é um microcontrolador baseado no núcleo 8051, com velocidade de trabalho do processador de até 33 MHz, memória flash de 8 Kbytes, 256x8 bits de memória volátil. Como algumas de suas características, tem um canal serial, transmissor/receptor assíncrono universal, do inglês *universal asynchronous receiver/transmitter* (UART) e até 32 portas de entrada e saída de propósito geral, do inglês *general purpose input and output* (GPIO) etc (ATMEL CORPORATION, 2008). Na Figura 7 pode ser visto o esquema dos pinos de um AT89S52 de 40 pinos.

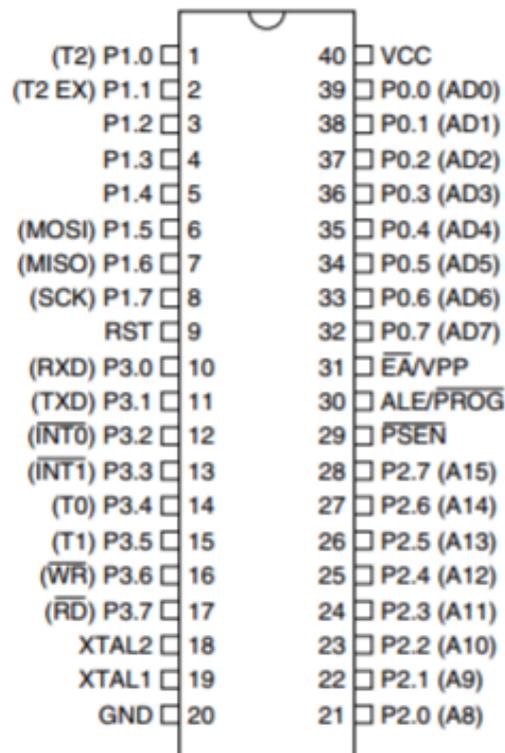


Figura 7 - Esquema dos pinos de um AT89S52 de 40 pinos
Fonte: Atmel Corporation (2008)

1.6.5 C.I. 74HC4066

O SN74HC4066 é um C.I. quádruplo com função de chave analógica bilateral, o mesmo foi projetado para trabalhar com sinais analógicos e digitais. Cada chave permite sinais com amplitude de até 6 V de pico. Na figura 8 pode ser visto o esquema dos pinos de um SN74HC4066.

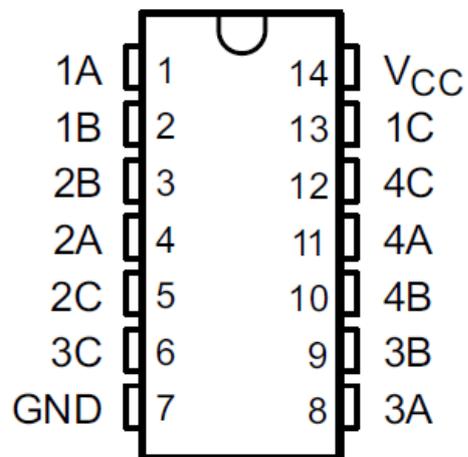


Figura 8 - Esquema dos pinos de um SN74HC4066
Fonte: (TEXAS INSTRUMENTS, 2003)

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 MATERIAIS

Os materiais utilizados nos testes preliminares dos circuitos desenvolvidos foram os *softwares* OrCAD PSpice 9.1 e Multisim 14.0. No desenvolvimento dos códigos para o microcontrolador utilizou-se do MCU 8051 IDE 1.4.9 para programação e ProgISP 1.72 para gravação juntamente com o *hardware* de gravação USBasp.

Na coleta de dados e testes práticos foram utilizados osciloscópio, gerador de função, multímetro, fonte de bancada e *protoboard*.

Os componentes dos circuitos foram resistores, capacitores, indutores, C.I oscilador 555, C.I 74HC4066, amplificador operacional LM318, regulador de tensão LM7805, microcontrolador AT89S52, cristal de 32 Mhz e transistores.

2.2 MÉTODOS

Para facilitar o desenvolvimento e entendimento deste trabalho, foi necessária a divisão do projeto em três módulos distintos, que poderiam estes ser integrados um ao outro. Tais módulos são o modulador, demodulador e acoplamento, vistos nas Figuras 9 e 10 que representam o transmissor e o receptor.

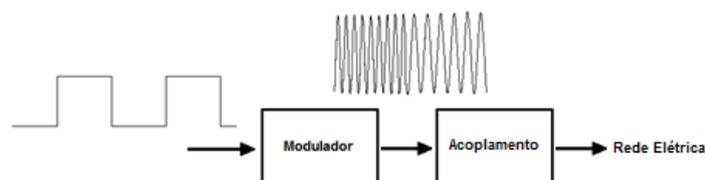


Figura 9 - Transmissor
Fonte: Autoria Própria

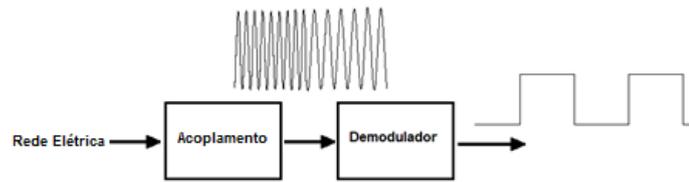


Figura 10 - Receptor
Fonte: Autoria Própria

2.2.1 Modulador FSK

Este módulo foi desenvolvido utilizando 2 circuitos osciladores com o C.I. 555, cada um gerando uma onda senoidal com as frequências estabelecidas de 159 kHz e 96 kHz e um C.I. 74HC4066 para selecionar qual das frequências vai para a saída de acordo com a entrada. Na Figura 11 pode ser visto o circuito oscilador configurado para gerar uma onda de aproximadamente 159 kHz.

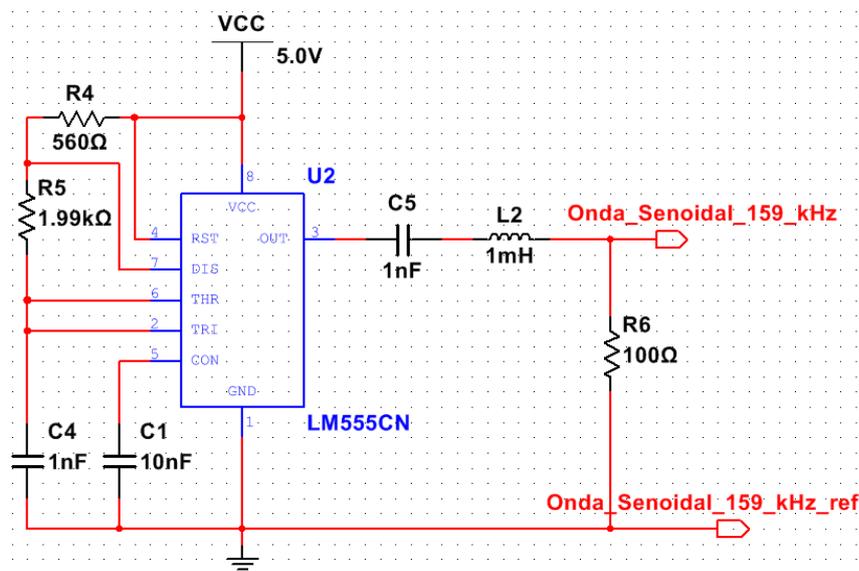


Figura 11 - Circuito oscilador de 159 kHz com C.I. 555 e filtro de saída
Fonte: Autoria Própria

No circuito da Figura 11 o C.I. 555 gera uma onda quadrada, a frequência da mesma é regulada pelo resistores R4 e R5 e pelo capacitor C4 como pode ser visto na equação (1).

$$f = \frac{1,44}{(R4+2R5)C4} \quad (1)$$

Para que a onda quadrada se torne uma onda senoidal a mesma passa por um filtro passa faixa RLC com frequência central igual a da onda quadrada, assim gerando uma onda senoidal na mesma frequência, no caso aproximadamente 159 kHz. O cálculo da frequência dada por L2 e C5 pode ser visto na equação (2), o valor do resistor é diretamente proporcional a largura da banda passante como pode ser notado na equação (3).

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_2C_5}} \quad (2)$$

$$\Delta f = \frac{R_6}{2\pi L_2} \quad (3)$$

Na Figura 12 pode ser vista a resposta em frequência do filtro RLC, onde f_c é a frequência central que pode ser calculada através da equação (2), Δf representa a largura de banda, que pode ser calculada através da equação (3), representadas por $f_c + \Delta f/2$ e $f_c - \Delta f/2$ estão as frequências de corte onde ocorrerá o ganho de -3 dB.

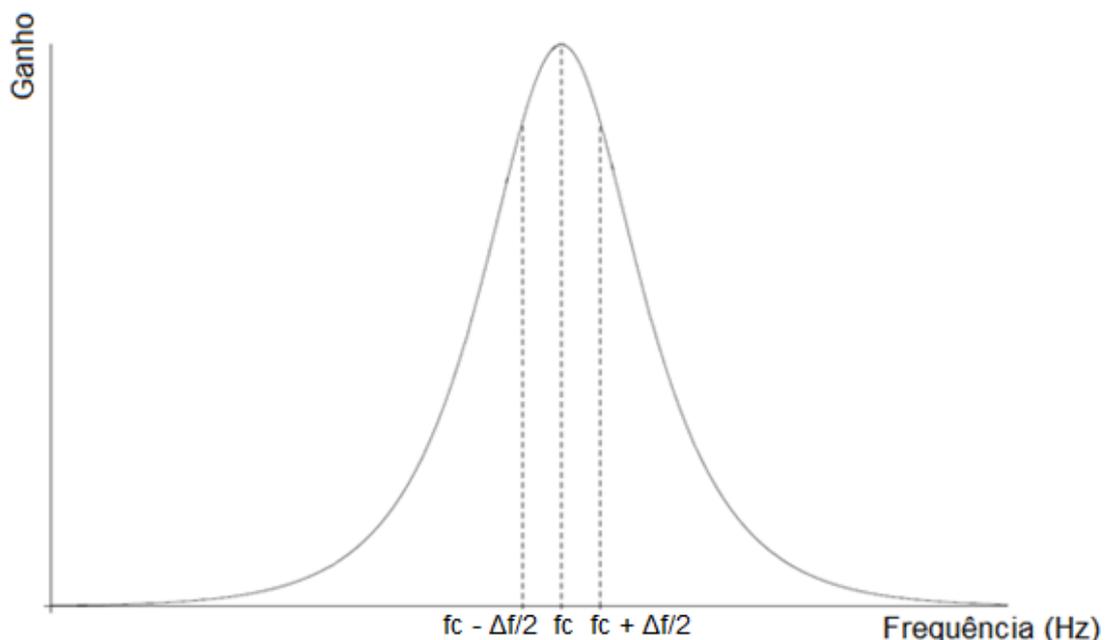


Figura 12 - Resposta em frequência do filtro RLC
Fonte: Autoria Própria

Analogamente à Figura 11, o segundo circuito oscilador deve operar a aproximadamente 96 kHz, para tal, os valores de R4, R5 e C5 no circuito devem ser ajustados para 390 Ω, 5,6 kΩ e 2,7 nF respectivamente, como pode ser visto na Figura 13.

O C.I. 74HC4066 não opera com sinais negativos nas entradas analógicas, por esse motivo foi necessário adicionar um nível CC (Corrente Contínua) aos sinais de entrada de 96 kHz e 159 kHz. Para tal, utilizou-se o circuito da Figura 15, que através de um divisor de tensão adiciona 2,5 V ao sinal que é atenuado pela metade.

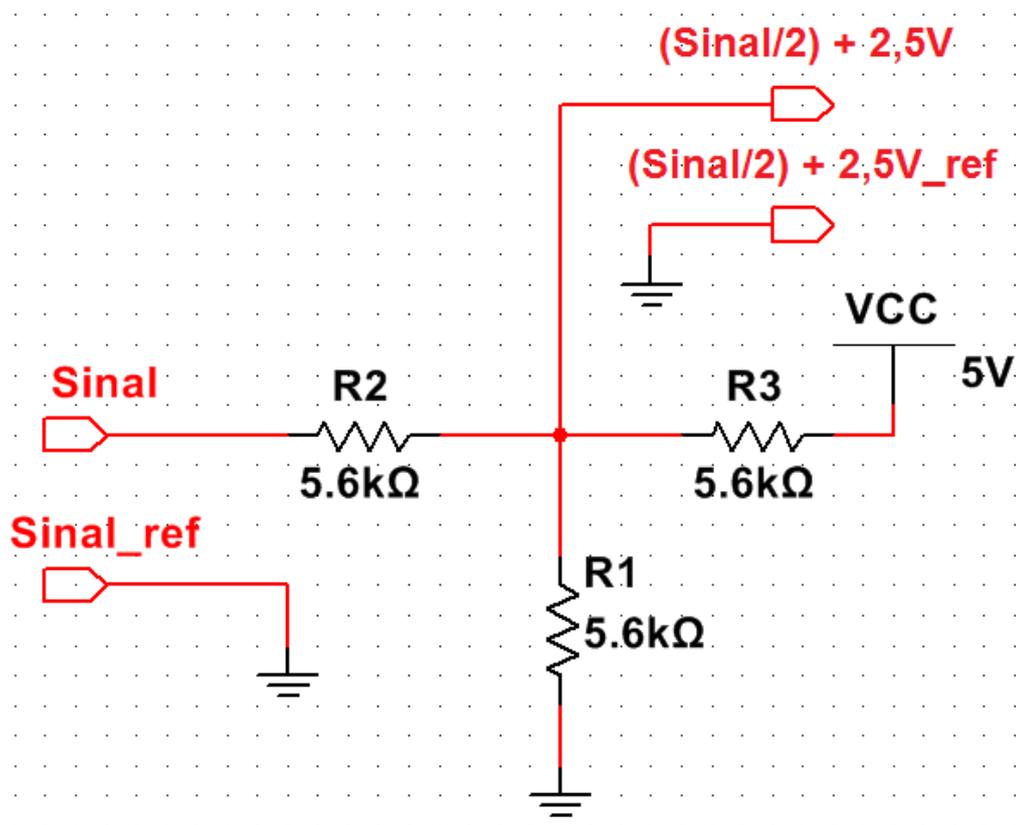


Figura 15 - Divisor de Tensão
Fonte: Autoria Própria

Após as frequências serem selecionadas, o sinal é amplificado com o amplificador operacional LM318. A configuração inversora usada neste circuito permite um ganho de 6,9 vezes, o qual é ajustado pelos resistores R11 e R12. O nível CC é removido pelo filtro RLC do tipo passa-banda, que tem sua frequência central ajustada entre as frequências de 96 kHz e 159 kHz para que os dois sinais tenham a mesma atenuação. O circuito amplificador é mostrado na Figura 16.

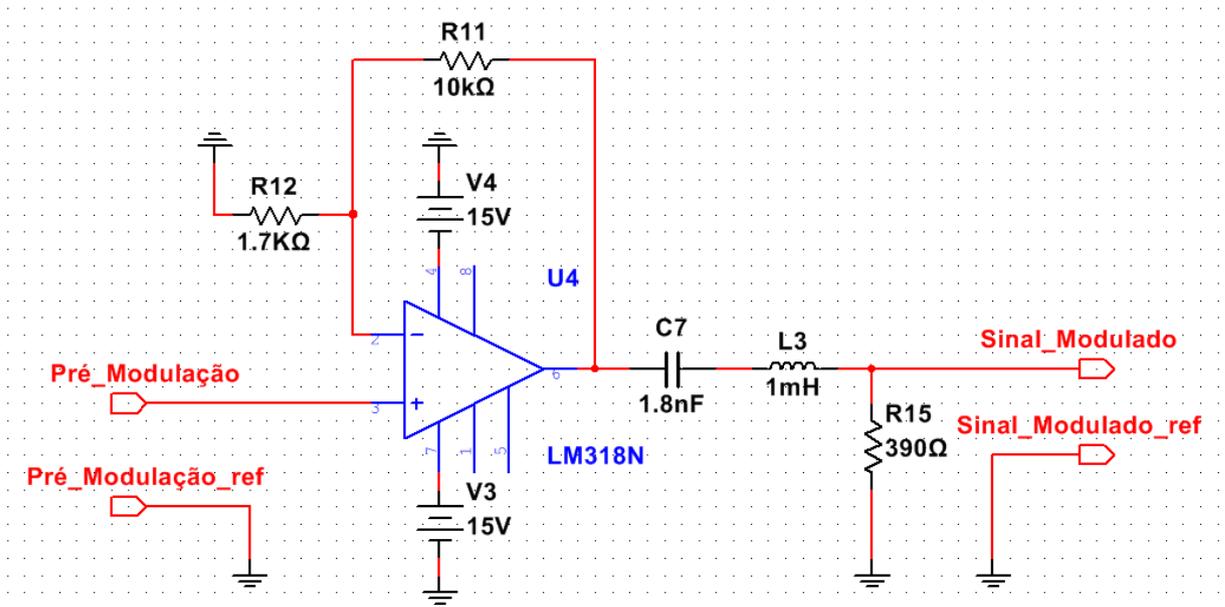


Figura 16 - Amplificador e filtro
Fonte: Autoria Própria

Ao fim do desenvolvimento foi possível juntar todos os circuitos como pode ser visto na Figura 17, onde uma entrada serial pode ser convertida em uma saída FSK, com as frequências de 159 kHz e 96 kHz.

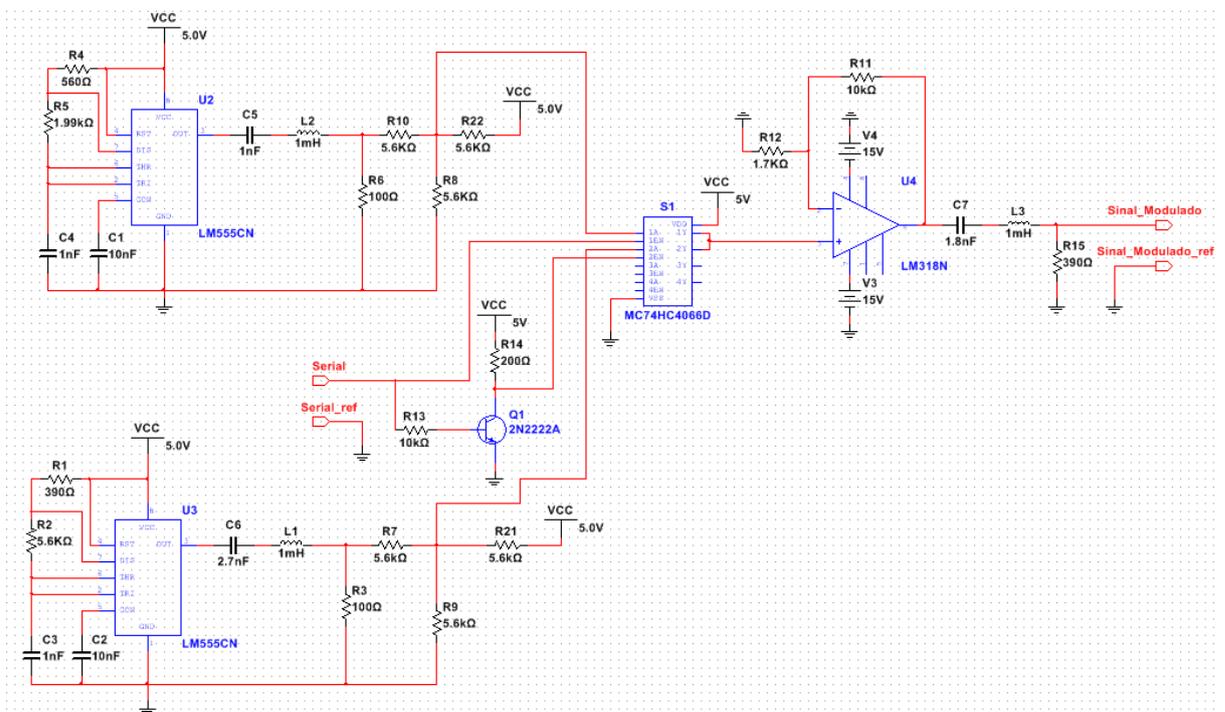


Figura 17 - Modulador de frequência
Fonte: Autoria Própria

2.2.2 Demodulador FSK

O demodulador é formado por um circuito que converte a onda senoidal em uma onda quadrada e pelo microcontrolador AT89S52 que detecta as frequências de 159 kHz e de 96 kHz e as converte em nível lógico alto e baixo, respectivamente, como pode ser visto na Figura 18.

Na Figura 18 pode ser visto o circuito que converte a onda senoidal em quadrada. O amplificador operacional LM318 trabalha como comparador com referência em 0 V, gerando uma onda quadrada de aproximadamente -15 V à 15 V. O transistor abre quando o sinal da base é -15 V e fecha quando o sinal é 15 V, desta forma a saída passa a ter amplitude de 5 V e 0 V. Neste ponto, a onda quadrada está pronta para ser aquirada pelo microcontrolador AT89S52, que detecta a frequência 159 kHz, como nível alto, e 96 kHz, como nível baixo. Desta forma, o sinal que foi originalmente aplicado ao modulador, no lado do transmissor, é então recuperado e apresentado na saída do demodulador.

O microcontrolador AT89S52 foi programado para selecionar entre as frequências de 159 kHz e 96 kHz, e converter a frequência mais alta em nível alto e a mais baixa em nível baixo. Desta forma é esperado que o código gere um pequeno atraso no sinal. O funcionamento do código, disponível no apêndice A, pode ser visto no fluxograma da Figura 19.

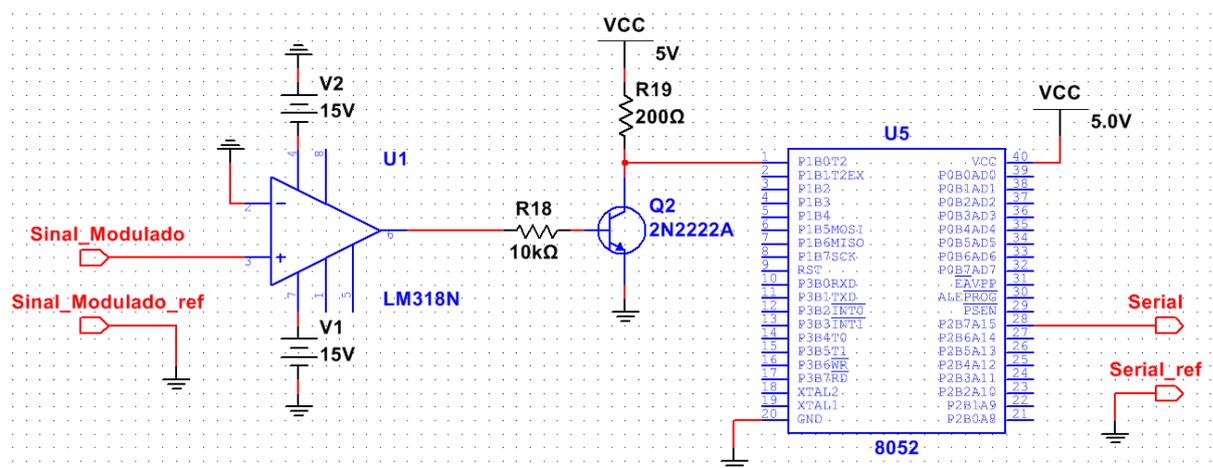


Figura 18 - Demodulador de frequência
Fonte: Autoria Própria

No fluxograma apresentado na Figura 19 P1_0 é a porta do microcontrolador que atua como entrada para o sinal com frequência de 159 kHz e 96 kHz, onde é

detectado período do sinal através do registrador TL0 do timer 0 do AT89S52, a variável H_count recebe o valor de TL0, e por fim a porta P2_7 tem sua saída escolhida de acordo com o tempo do período da onda.

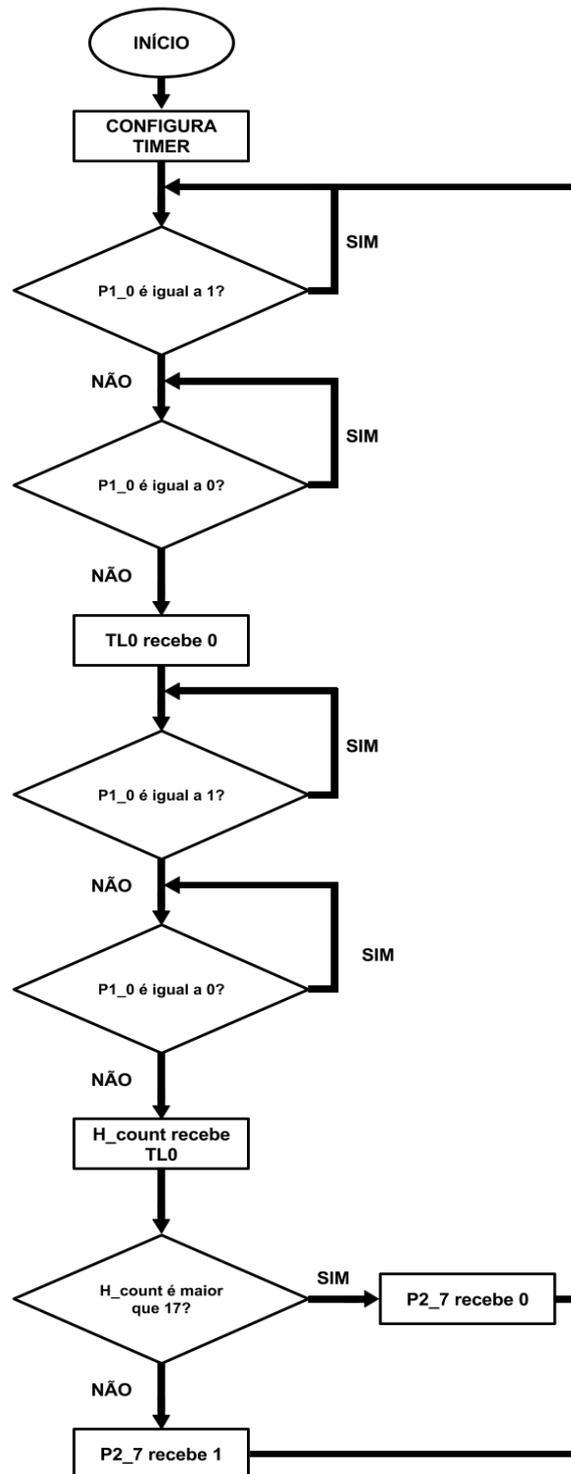


Figura 19 - Fluxograma
Fonte: Autoria Própria

2.2.3 Acoplamento

O acoplamento utilizado foi o mesmo visto em (BARBANTE, 2009), consistindo de um filtro passivo do tipo passa-alta, conforme mostrado na Figura 20. No circuito original o indutor L3 possui valor de 220 mH. Devido à indisponibilidade deste componente, o mesmo foi alterado para 1 mH.

Foi constatado através de simulações que a resposta em frequência desse filtro corresponde ao necessário para o trabalho, como pode ser visto ao comparar o a resposta em frequência com o indutor de 1 mH e com o indutor de 220 mH na Figura 21. o ganho das frequências de interesse com o indutor de 1 mH está dentro do esperado, isto é, para 96 kHz e 159 kHz, o ganho é de aproximadamente 0 dB, enquanto que para 60 Hz o ganho é de aproximadamente -125 dB

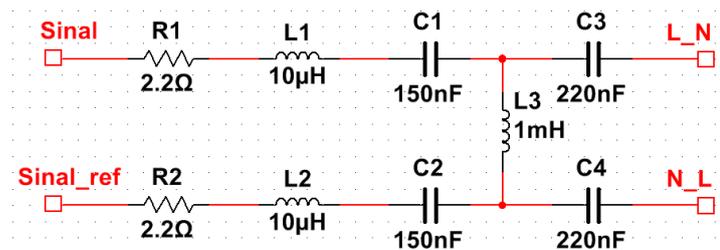


Figura 20 - Acoplamento de rede
Fonte: Autoria Própria

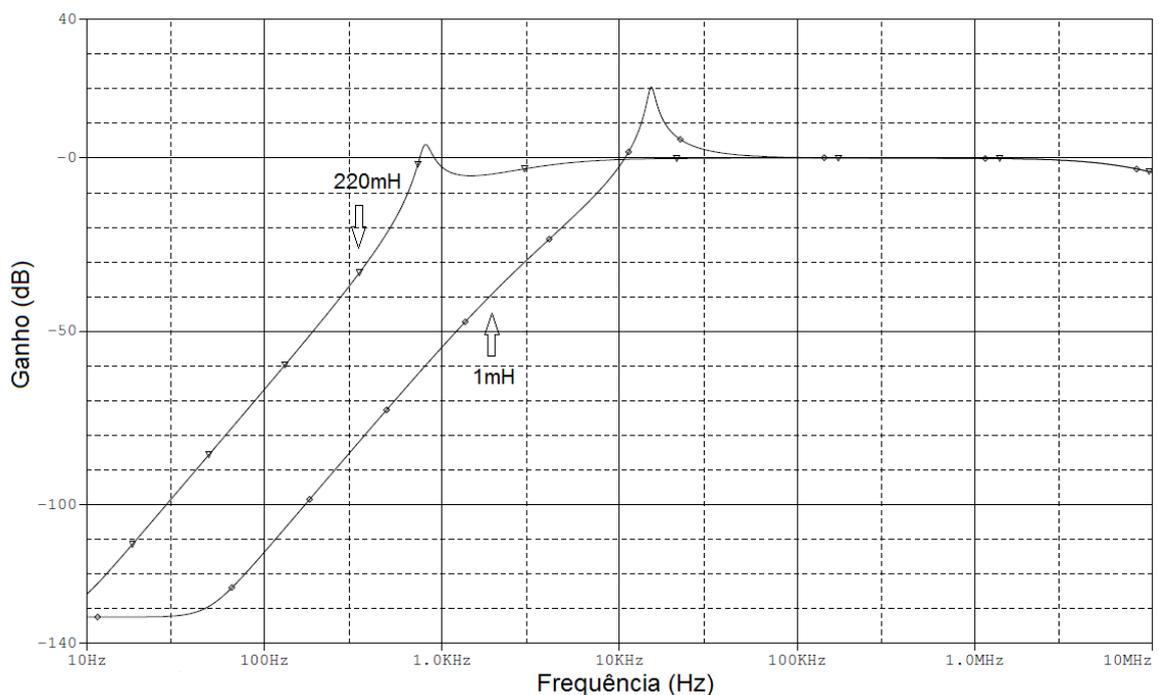


Figura 21 - Resposta em frequência do acoplamento com indutor de 1 mH e 220 mH
Fonte: Autoria Própria

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo traz uma série de testes executados no sistema de transmissão e recepção PLC. Os testes realizados são:

- Teste 1: circuitos do modulador e demodulador sem acoplamento e sem rede;
- Teste 2: circuito de acoplamento com a rede;
- Teste 3: modulador e demodulador com acoplamento e sem rede;
- Teste 4: sistema completo ligado à rede elétrica; e
- Teste 5: sistema completo conectado à rede elétrica e com carga injetando ruídos.

Nas próximas seções o procedimento de teste é detalhado e os resultados são apresentados.

3.1 TESTE 1: MODULADOR E DEMODULADOR

Na Figura 22 pode ser visto o sinal quadrado gerado pelo circuito com o C.I. 555 proposto na Figura 11, a frequência da onda é de 154 kHz, um pouco diferente da frequência calculada de 159 kHz. Há uma distorção na onda quadrada, que é causada pelo filtro RLC na saída.

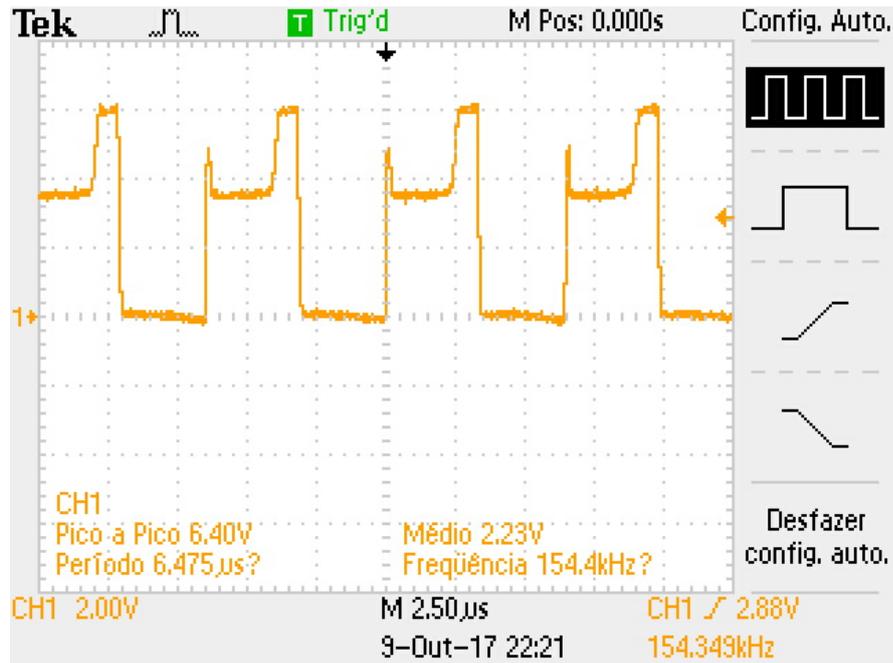


Figura 22 - Onda quadrada de saída do C.I. 555
Fonte: Autoria Própria

Após passar pelo filtro passa-faixa mostrado na Figura 11, a onda se torna senoidal, com a mesma frequência, como ilustrado na Figura 23. Nota-se também que a distorção na onda quadrada não tem influencia significativa na onda senoidal.

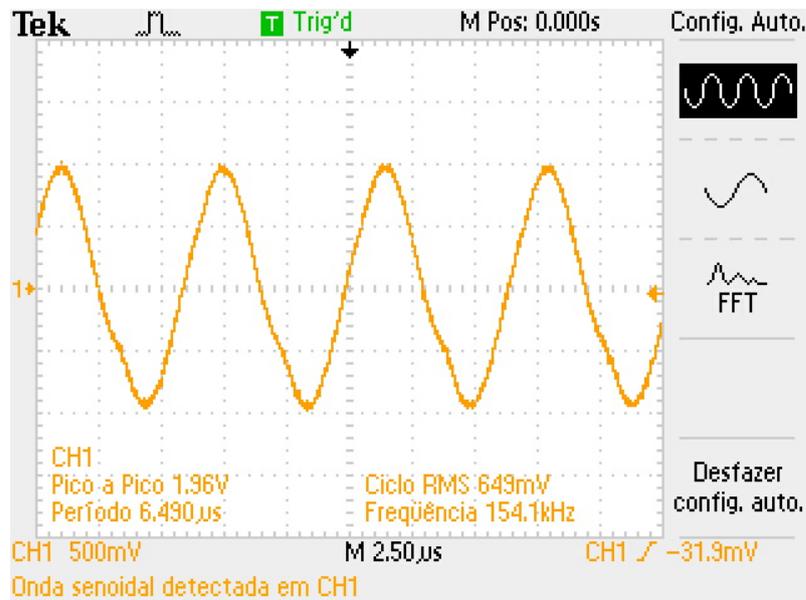


Figura 23 - Onda quadrada filtrada
Fonte: Autoria Própria

Na Figura 24 é mostrada a modulação do sinal ainda com o nível CC. O sinal no canal 2 é o sinal aplicado a entrada do modulador e o sinal no canal 1 é o sinal pré-modulado visto na Figura 14. Comparando os dois sinais é possível ver a

seleção de frequência, aproximadamente 159 kHz para nível lógico alto e aproximadamente 96 kHz para nível lógico baixo. Percebe-se também uma transição brusca da frequência, o que é esperado, por conta do método de chaveamento da frequência.

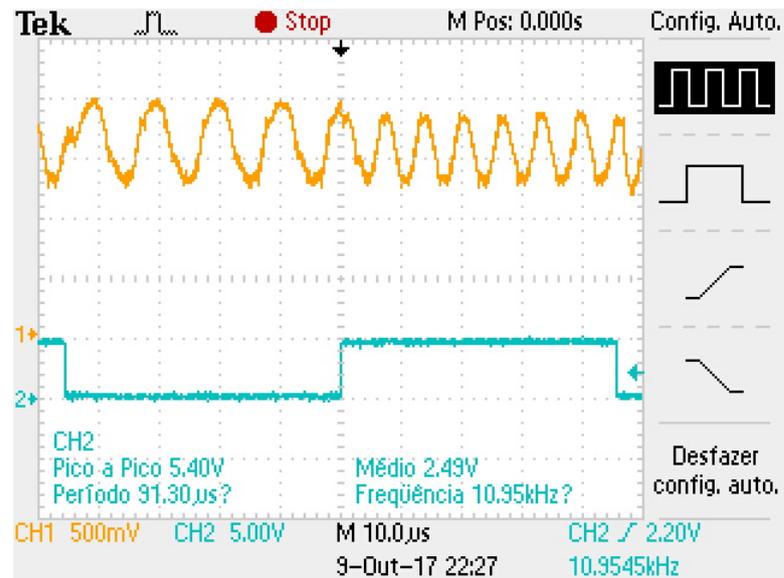


Figura 24 - Sinal modulado com nível CC
Fonte: Autoria Própria

O sinal é então amplificado e o nível CC é removido, isto gera o sinal modulado em frequência, no caso a saída do modulador, como pode ser visto na Figura 25, no canal 2 está a entrada do modulador e no canal 1 está o sinal modulado, de forma análoga à Figura 24.

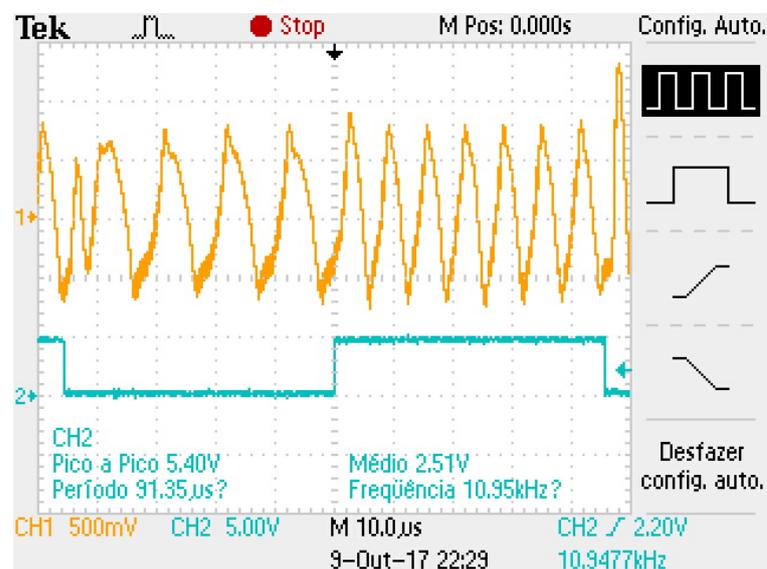


Figura 25 - Sinal modulado
Fonte: Autoria Própria

Quando o sinal modulado visto no canal 1 da Figura 26 é aplicado ao comparador visto na Figura 18, a saída é uma onda quadrada com nível de tensão variando de -15 à 15 V que pode ser vista no canal 1 da Figura 26, no canal 2 da mesma Figura está o sinal de entrada do modulador, o que possibilita a comparação dos sinais confirmando que as frequências de 159 kHz e 96 kHz se mantêm.

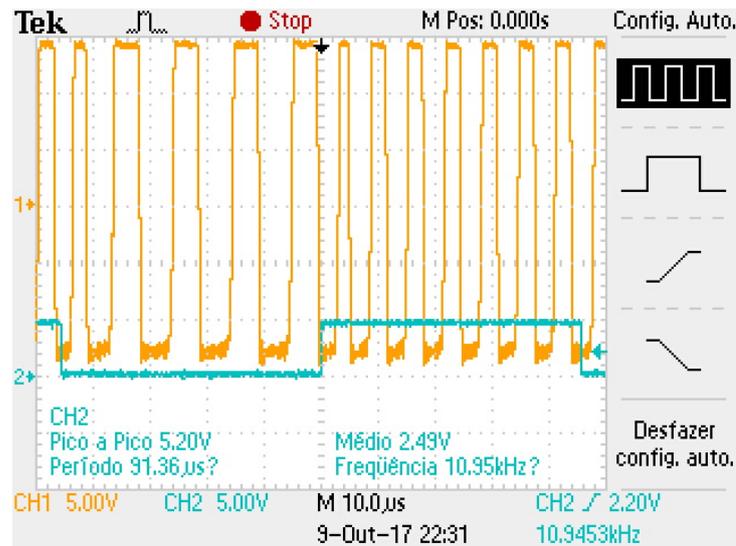


Figura 26 - Sinal de saída do comparador
Fonte: Autoria Própria

Na Figura 27 é mostrado o sinal de saída do transistor visto na Figura 18, uma onda quadrada com amplitude de 5 V a 0 V no canal 1, que será a entrada do microcontrolador, que gera a saída do demodulador. No canal 2 está a entrada do modulador para possibilitar a comparação das frequências de modulação com a entrada do modulador.

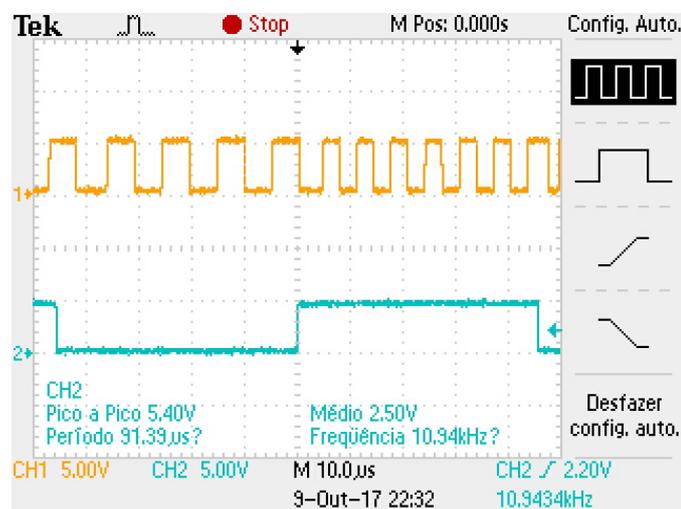


Figura 27 - Sinal de entrada do microcontrolador
Fonte: Autoria Própria

Por fim, na Figura 28 estão comparados o sinal de entrada do modulador e o sinal de saída do demodulador. O sinal do canal 1 é a saída do demodulador enquanto o do canal 2 é a entrada do modulador. Existe um atraso de aproximadamente 100 us, o que já era esperado levando em consideração a natureza do código do microcontrolador, os filtros passa-faixa do modulador, o próprio acoplamento e os amplificadores operacionais.

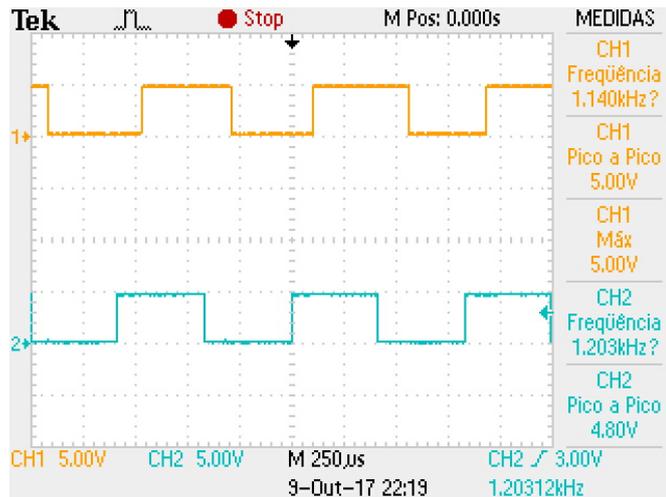


Figura 28 - Sinais modulado e demodulado
Fonte: Autoria Própria

3.2 TESTE 2: CIRCUITO DE ACOPLAMENTO

Foi montado um circuito de teste para o acoplamento, que pode ser visto na Figura 29. Por motivo de segurança os circuitos de acoplamento não foram ligados diretamente à rede, mas sim a um transformador abaixador com relação de transformação 1,4:1. Logo, o transformador reduz a tensão da rede 127 V eficazes para 90 V eficazes. Um indutor (L1) foi inserido em série para simular a impedância da rede. O circuito de teste foi montado conforma a Figura 29.

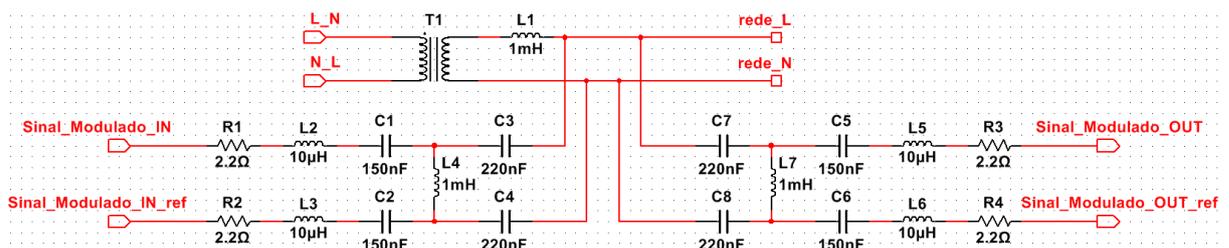


Figura 29 - Circuito de teste do acoplamento
Fonte: Autoria Própria

Na entrada do acoplamento do transmissor (*Sinal_Modulado_IN*) foi conectado um gerador de funções configurado para gerar uma onda senoidal de 159 kHz e posteriormente uma senoide de 96 kHz. As senoides têm amplitude de 2 V.

Na rede, entre os pontos (*rede_L*) e (*rede_N*), foi medido o sinal da rede já com o sinal PLC sobreposto, conforme se verifica na Figura 30. Através da ampliação do sinal, na Figura 30 (b), em torno da área pontilhada da Figura 30 (a) é possível ver o sinal de 96 kHz.

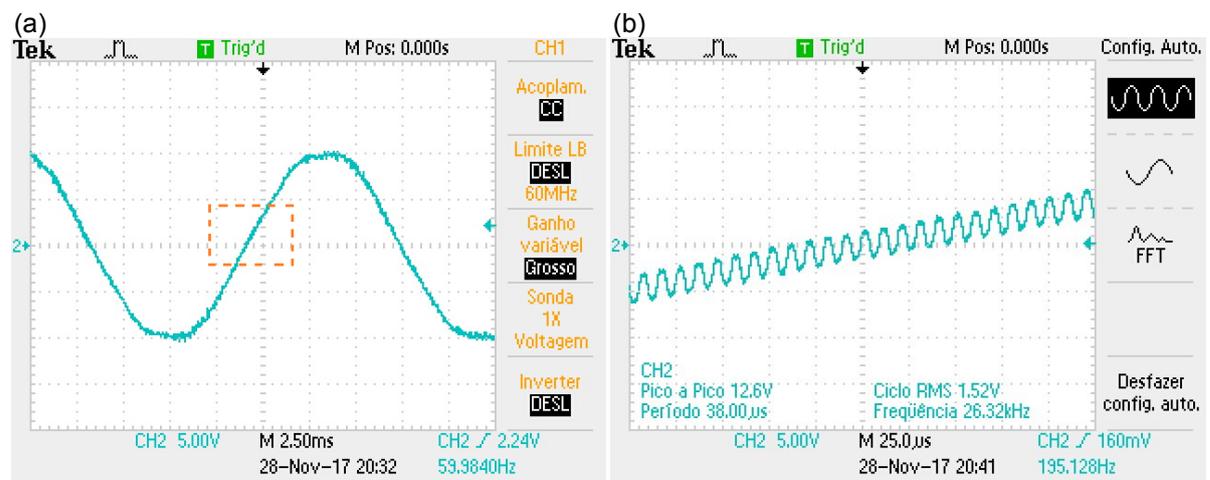


Figura 30 - Sinal medido na rede entre os pontos *rede_L* e *rede_N* quando aplicado sinal de 96 kHz: (a) Ciclo completo da tensão da rede; (b) Ampliação da área pontilhada

Na Figura 31 é mostrada a transformada rápida de Fourier (FFT) do sinal da rede, o qual é medido entre pontos (*rede_L*) e (*rede_N*) quando aplicado o sinal de 96 kHz. Verifica-se que as componentes da FFT estão nas frequências de 60 Hz e 96 kHz.



Figura 31 - FFT da rede com sinal de 96 kHz
Fonte: Autoria Própria

Analogamente ao caso anterior, quando aplicado o sinal de 159 kHz as componentes da FFT estão em 159 kHz e em 60 Hz, como pode ser visto na Figura 32. Isso demonstra que o acoplamento permite a passagens dos sinais nas frequências projetadas.

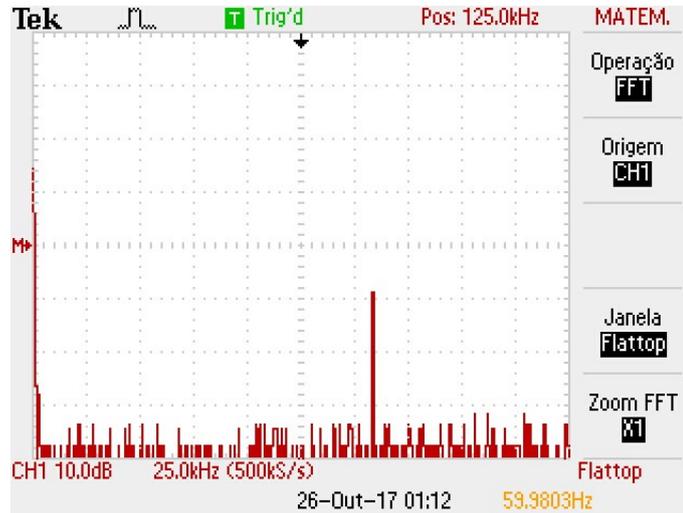


Figura 32 - FFT da rede com sinal de 159 kHz
Fonte: Autoria Própria

Os sinais de 159 kHz e 96 kHz são medidos no saída do circuito de acoplamento do receptor, isto é, entre os pontos (*Sinal_Modulado_OUT* e *Sinal_Modulado_OUT_ref*). Desta forma os sinais podem ser vistos na Figura 33 e na Figura 34, respectivamente. Nota-se que o sinal da rede de 60 Hz foi rejeitado pelo acoplamento enquanto que os sinais de 159 kHz e 96 kHz não sofreram atenuação significativa.

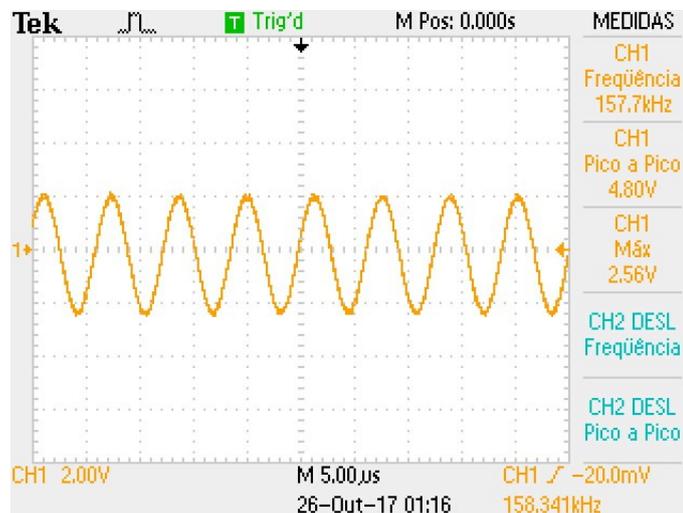


Figura 33 - Sinal de 159 kHz (*Sinal_Modulado_OUT*)
Fonte: Autoria Própria

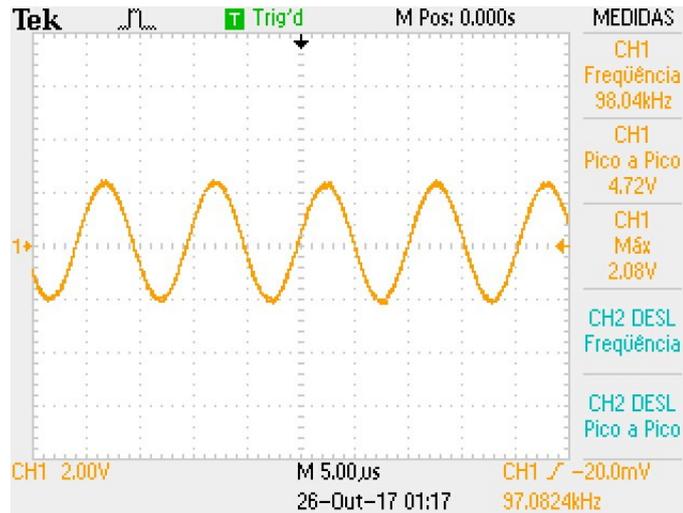


Figura 34 - Sinal de 96 kHz (*Sinal_Modulado_OUT*)
 Fonte: Autoria Própria

3.3 TESTE 3: MODULADOR E DEMODULADOR COM ACOPLAMENTO

Os testes a seguir foram realizados para testar o sistema inteiro, já considerando a conexão do modulador, demodulador e filtros de acoplamento. Neste teste a rede foi desconectada.

As medidas apresentadas nesta seção foram feitas utilizando sistema mostrado na Figura 35. Na entrada do primeiro acoplador foi aplicado o sinal (*Sinal_Modulado_IN*), oriundo da saída do modulador mostrado na Figura 17. Este sinal é mostrado na Figura 36.

Na rede, isto é, entre os dois acopladores foi medido o sinal (*Sinal_Modulado_Inter*), o qual é mostrado na Figura 37.

A saída do segundo acoplador, (*Sinal_Modulado_OUT*), foi ligada a entrada do demodulador mostrado na Figura 18. A forma de onda do sinal aplicado no demodulador é mostrada na Figura 38.

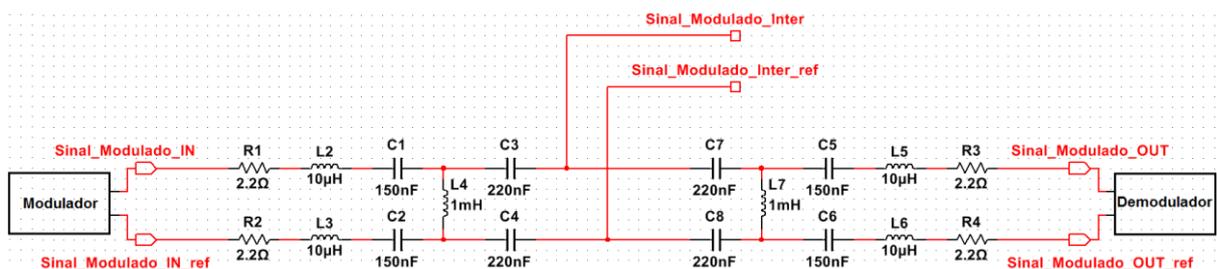


Figura 35 - Acoplamentos
 Fonte: Autoria Própria

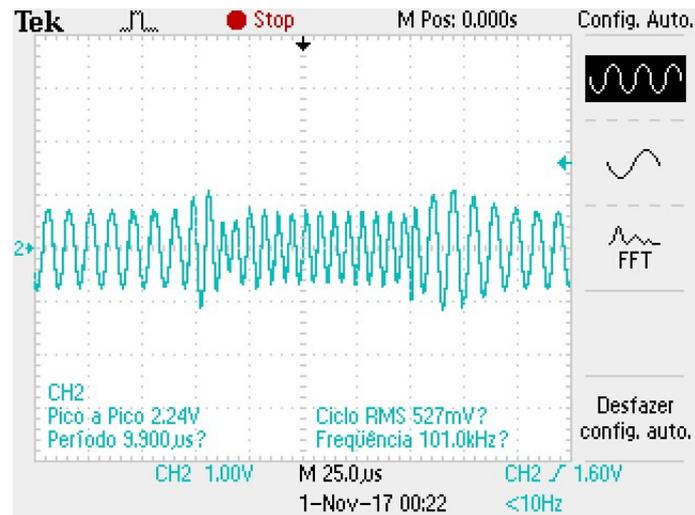


Figura 36 - Sinal na entrada do primeiro acoplamento (Sinal_Modulado_IN)
 Fonte: Autoria Própria

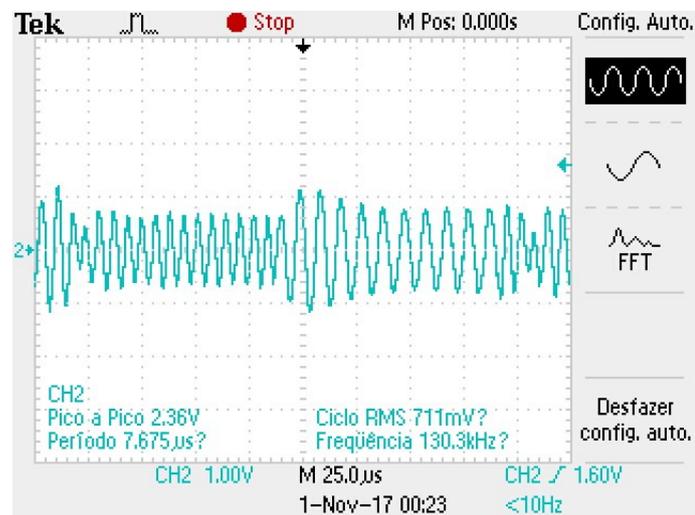


Figura 37 - Sinal entre os dois acoplamentos (Sinal_Modulado_Inter)
 Fonte: Autoria Própria

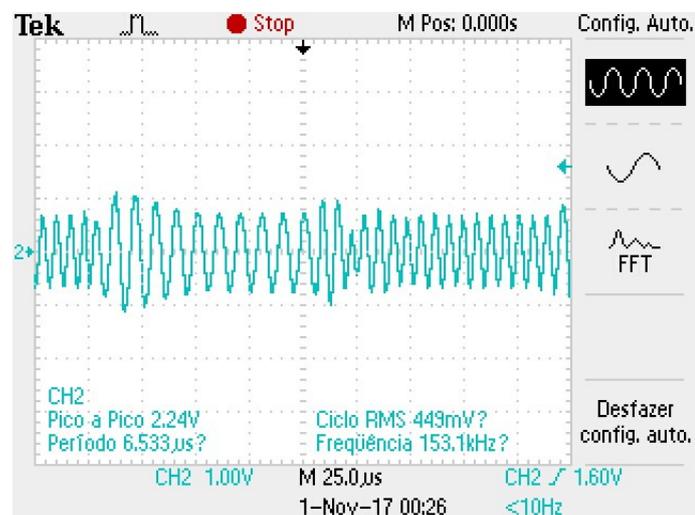


Figura 38 - Sinal na saída do segundo acoplamento (Sinal_Modulado_OUT)
 Fonte: Autoria Própria

Como pode ser visto, o sinal está de acordo com o esperado, o mesmo não sofre atenuação significativa na frequência de 96 kHz e tampouco na frequência de 159 kHz.

Na Figura 39 podem ser comparadas as formas de onda do sinal digital na entrada do modulador, canal 2, e a forma de onda na saída do demodulador, canal 1. O resultado é similar ao da Figura 28, mostrando que o acoplamento não interfere no funcionamento apropriado dos circuitos modulador e demodulador.

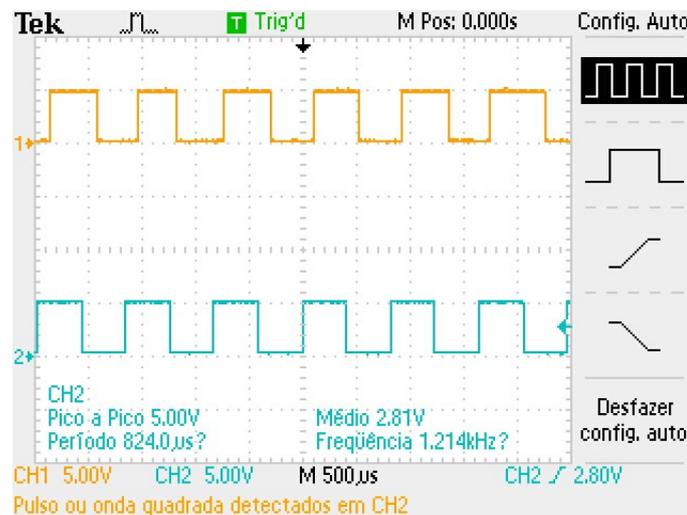


Figura 39 - Sinal modulado e demodulado com acoplamento
Fonte: Autoria Própria

3.4 TESTE 4: SISTEMA COMPLETO

Os testes a seguir são similares aos realizados na seção 3.3, mas desta vez os testes foram feitos no sistema mostrado na Figura 40, que é similar ao visto na Figura 35, porém com adição da rede por um transformador abaixador com relação de transformação 1,4:1 e um indutor (L1) em série para simular a impedância da rede.

Analogamente à seção 3.3, na entrada do primeiro acoplador foi aplicado o sinal (*Sinal_Modulado_IN*), oriundo da saída do modulador mostrado na Figura 17. Este sinal é mostrado na Figura 41.

Na rede, isto é, entre os dois acopladores foi medido o sinal entre os pontos (*rede_L*) e (*rede_N*), na Figura 42 é mostrado o sinal de 60 Hz. Através da

ampliação do sinal, na Figura 42 (b), em torno da área pontilhada da Figura 42 (a) é possível ver o sinal modulado.

A saída do segundo acoplador, (*Sinal_Modulado_OUT*), foi ligada a entrada do demodulador mostrado na Figura 18. A forma de onda do sinal aplicado no demodulador é mostrada na Figura 43.

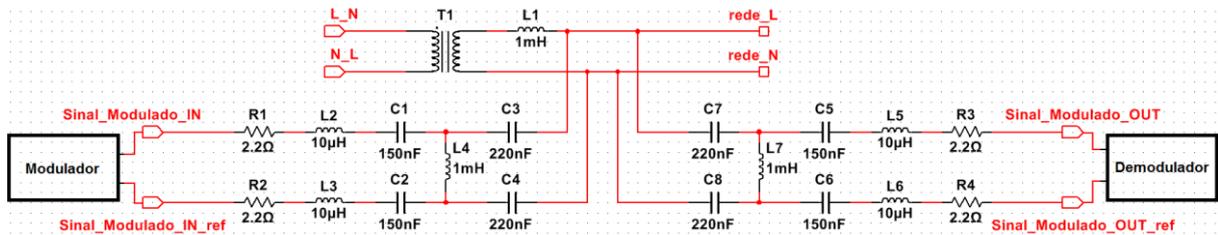


Figura 40 - Sistema completo

Fonte: Autoria Própria

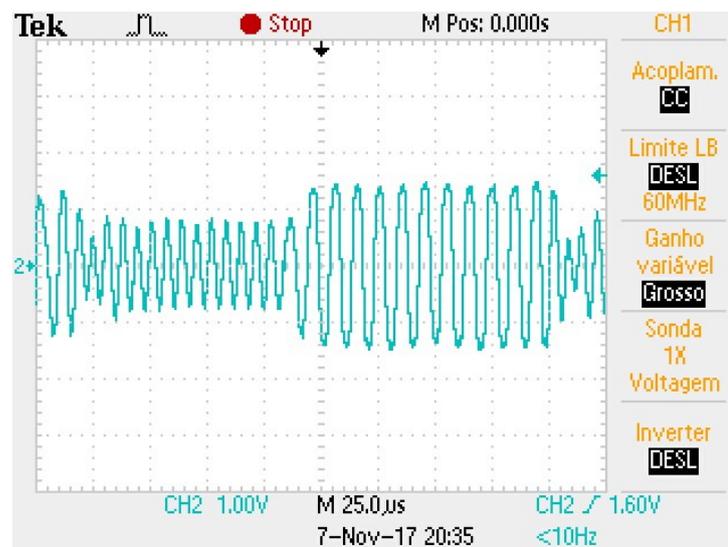


Figura 41 - Sinal de entrada do acoplamento com rede (*Sinal_Modulado_IN*)

Fonte: Autoria Própria

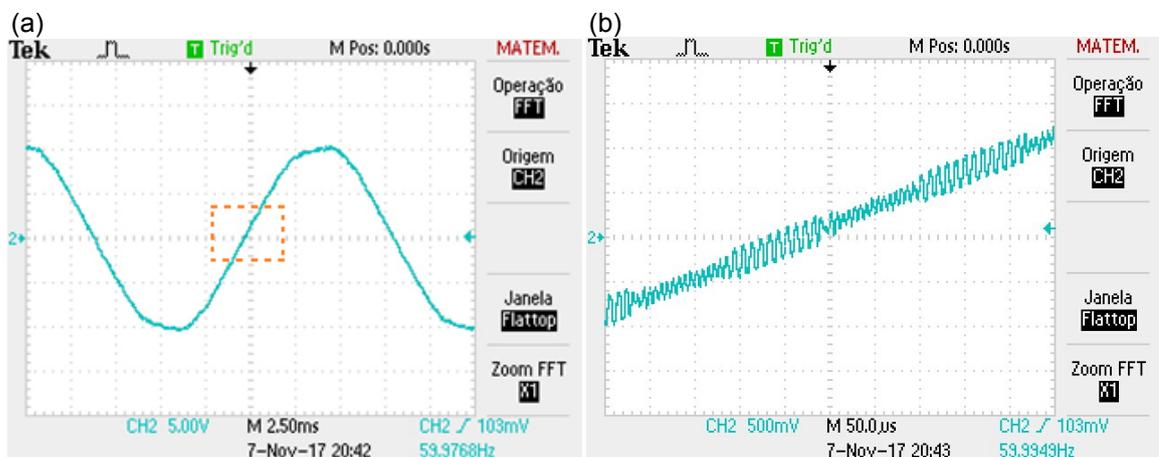


Figura 42 - Sinal medido na rede entre os pontos *rede_L* e *rede_N*: (a) Ciclo completo da tensão da rede; (b) Ampliação da área pontilhada

Fonte: Autoria Própria

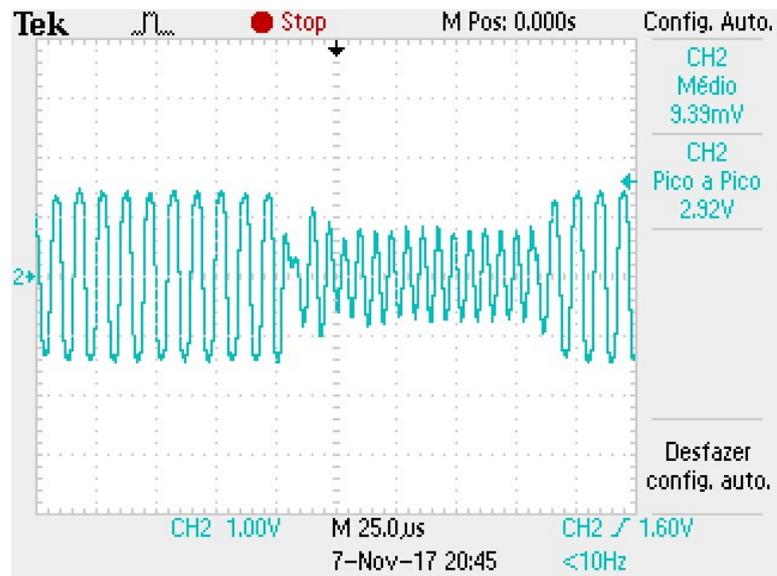


Figura 43 - Sinal na saída do acoplamento com rede (Sinal_Modulado_OUT)
 Fonte: Autoria Própria

Na Figura 44 podem ser comparadas as formas de onda do sinal digital na entrada do modulador, canal 2, e a forma de onda na saída do demodulador, canal 1. O resultado é similar ao das Figuras 28 e 39, mostrando que a rede não interfere no funcionamento apropriado dos circuitos modulador e demodulador.

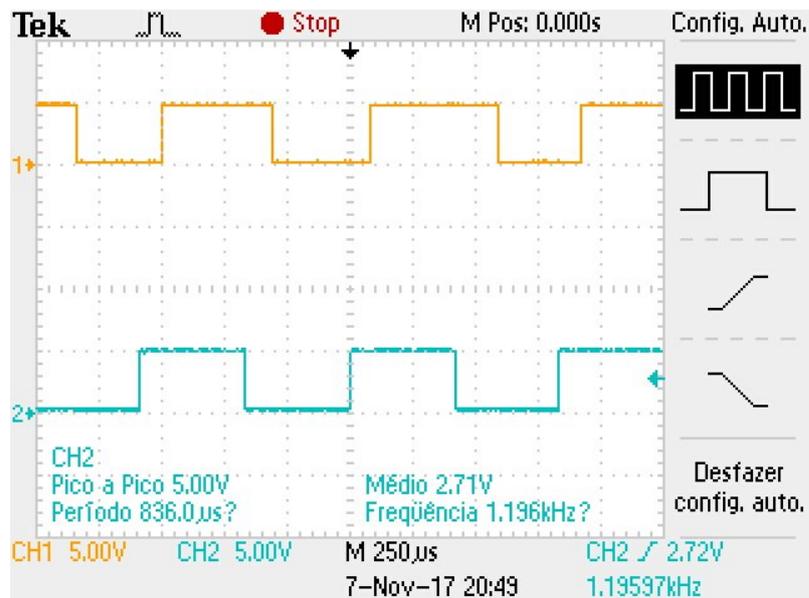


Figura 44 - Sinal modulado e demodulado com acoplamento e rede
 Fonte: Autoria Própria

3.5 TESTE 5: SISTEMA COMPLETO COM CARGA CONECTADA À REDE

Os testes a seguir são similares aos realizados na seção 3.4, no entanto os testes foram feitos no sistema mostrado na Figura 45, que é similar ao visto na Figura 40, mas com a conexão de uma carga à rede, ou seja, entre os pontos (*rede_L*) e (*rede_N*). A carga escolhida para o teste foi uma furadeira, por gerar um nível elevado de ruído na rede, devido ao uso de um motor com escovas.

Analogamente à seção 3.3 e 3.4, na entrada do primeiro acoplador foi aplicado o sinal (*Sinal_Modulado_IN*), oriundo da saída do modulador mostrado na Figura 17. Este sinal é mostrado na Figura 46, o ruído gerado pela carga fica claro ao comparar o sinal em questão com o sinal obtido na Figura 41.

Na rede, isto é, entre os dois acopladores foi medido o sinal entre os pontos (*rede_L*) e (*rede_N*), conforme Figura 47, onde é mostrado o sinal de 60 Hz já sobreposto ao sinal modulado. O ruído parece ser pouco perceptível na Figura 47 (a). Entretanto, na ampliação do sinal, na Figura 47 (b), em torno da área pontilhada da Figura 47 (a), nota-se claramente o ruído introduzido pela carga.

A saída do segundo acoplador, (*Sinal_Modulado_OUT*), foi ligada à entrada do demodulador mostrado na Figura 18. A forma de onda do sinal aplicado no demodulador é mostrada na Figura 48, ao compará-lo com o sinal da Figura 43 nota-se uma grande influência do ruído.

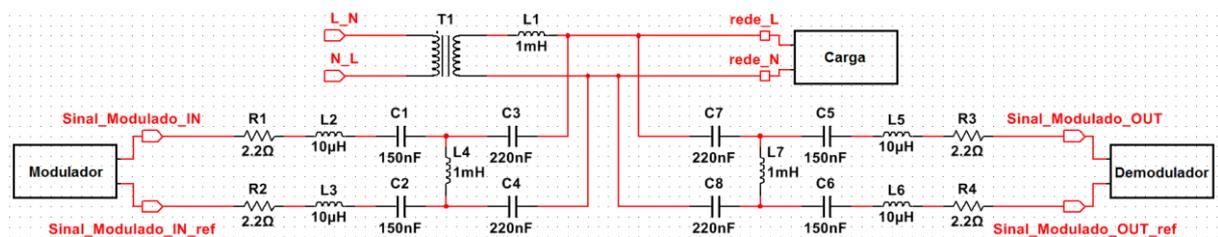


Figura 45 - Sistema completo com carga
Fonte: Autoria Própria

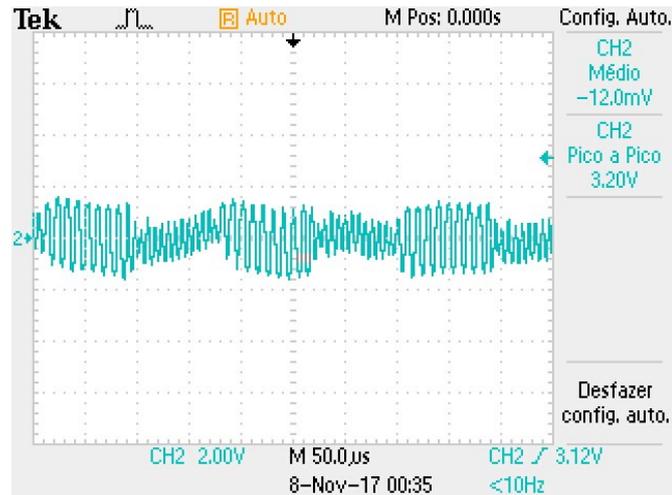


Figura 46 - Entrada do acoplamento do modulador com carga conectada à rede (Sistema_Modulado_IN)
Fonte: Autoria Própria

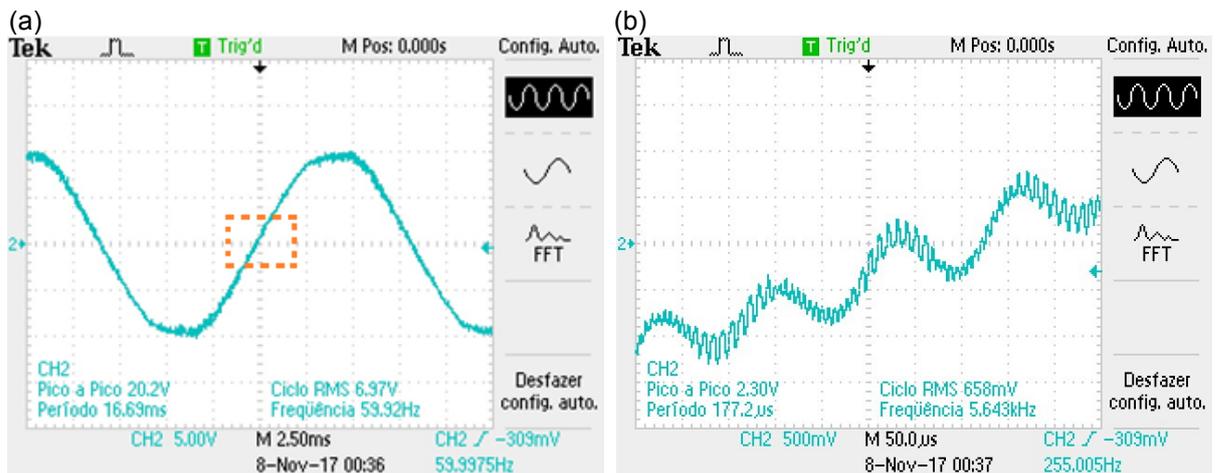


Figura 47 - Sinal medido na rede entre os pontos rede_L e rede_N com carga: (a) Ciclo completo da tensão da rede; (b) Ampliação da área pontilhada
Fonte: Autoria Própria

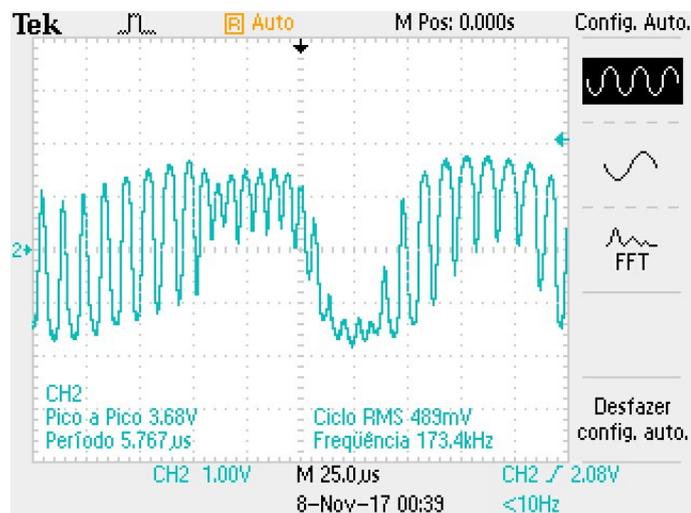


Figura 48 - Saída do acoplamento do demodulador com carga conectada à rede (Sistema_Modulado_OUT)
Fonte: Autoria Própria

Na Figura 49 pode ser vista a FFT da tensão da rede, medida entre (rede_L) e (rede_N), com a carga desligada. As componentes principais do sinal são os 60 Hz da rede e 159 kHz do sinal transmitido. Na Figura 50 a carga foi conectada à rede, sendo visível o alto nível de ruído gerado pela carga na frequência de aproximadamente 10 kHz.

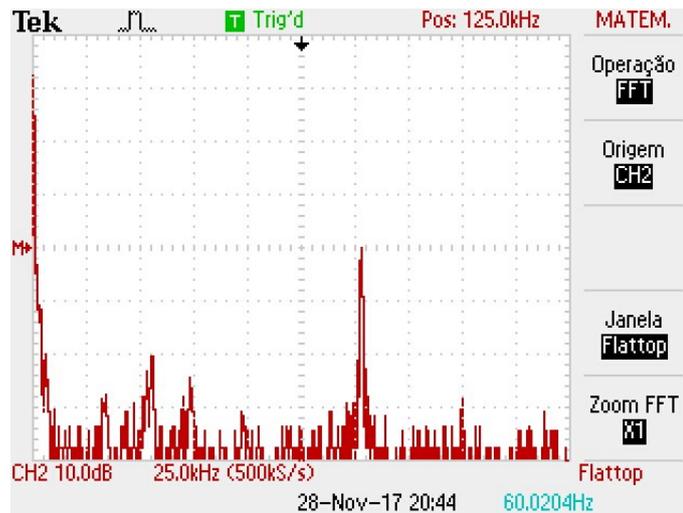


Figura 49 - FFT da onda de 159 kHz com a carga desligada
Fonte: Autoria Própria

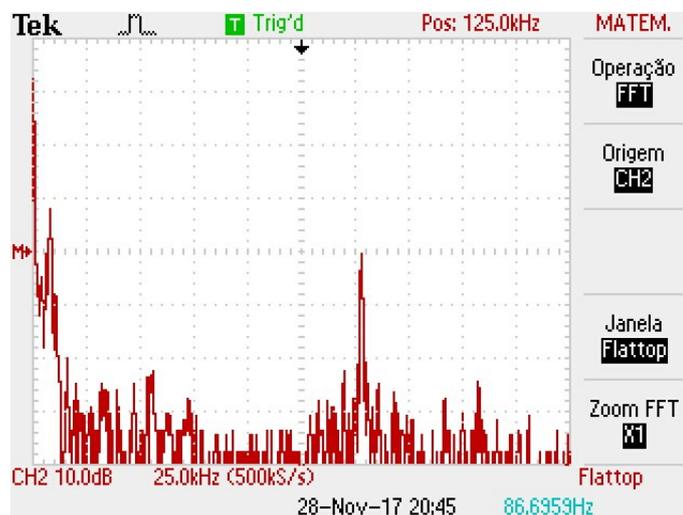


Figura 50 - FFT da onda de 159 kHz com a carga ligada
Fonte: Autoria Própria

Na Figura 51 podem ser comparadas as formas de onda do sinal digital na entrada do modulador, canal 2, e a forma de onda na saída do demodulador, canal 1. As duas formas de onda são consideravelmente diferentes, assim como o resultado é díspar ao das Figuras 28 e 39, mostrando que a carga, que gera corrente ruidosa, interfere na transmissão apropriada do sinal modulado.

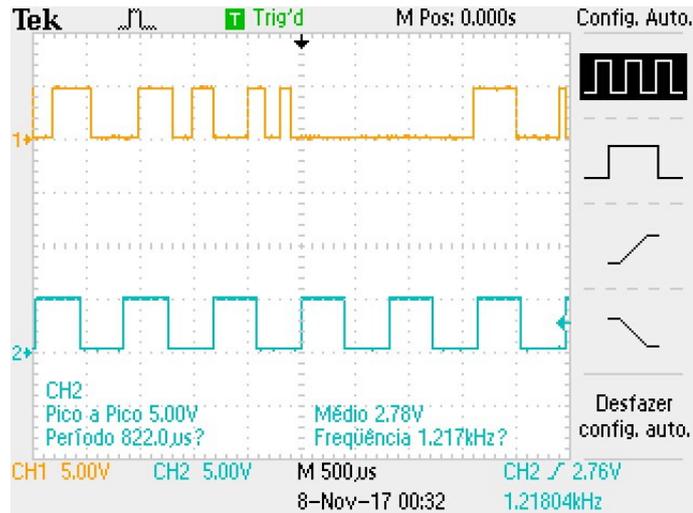


Figura 51 - Sinais modulado e demodulado
 Fonte: Autoria Própria

3.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados deste trabalho ficaram dentro do esperado. Foi possível gerar duas ondas senoidais de frequências diferentes e modulá-las para transmitir um sinal digital. Verificou-se, ainda, que o acoplamento de rede funciona de acordo com o esperado, rejeitando o sinal de 60 Hz da rede, enquanto não atenua o sinal modulado significativamente.

O atraso visto na Figura 28, ocorre pela natureza do código e também pela própria limitação do timer do AT89S52 que divide o *clock* de entrada por 12, assim como, os filtros passa-faixa do modulador, o próprio filtro de acoplamento e os amplificadores operacionais presentes nos circuitos dos moduladores. Uma possível forma de diminuir esse atraso pode ser utilizar um microcontrolador com um *clock* mais elevado.

Na Figura 51 fica claro que a carga influencia no funcionamento do sistema proposto por conta do acoplamento não filtrar o ruído apropriadamente. Desta forma, ficam como sugestões para trabalhos futuros o aprimoramento do acoplamento, através do ajuste da frequência de corte em uma frequência mais baixa, ou mesmo a utilização de um filtro do tipo passa-faixas para realizar o acoplamento do circuito com a rede. Além disso, também pode ser estudada a possibilidade de desenvolvimento de um modulador e demodulador mais robustos, capazes de operar em condições severas de ruídos na rede.

REFERENCIAS

- AHN, J. A. J. et al. A study of ISO/IEEE11073 platform based on power line communication. **14th Asia-Pacific Conference on Communications**, 2008.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS. **Equipamento eletromédico Parte 1-2: Requisitos gerais para segurança básica e desempenho essencial**. Brasil: ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2010.
- ATMEL CORPORATION. **8-bit Microcontroller with 8K Bytes In-System Programmable FlashMemory**, 2008.
- BARBANTE, C. C. **Um sistema simplificado para transmissão de dados em rede de energia elétrica : Concepção do circuito , protótipo e proposta de integração**. [s.l.] UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS, 2009.
- FERREIRA, M. V. DE A. **PLC - Power Line Communication**. Niterói: Universidade Federal Fluminense, 2005.
- HAYKIN, S.; MOHER, M. **Introduction to Analog and Digital Communications**. 2. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2007.
- LATHI, B. P. **Modern Digital and Analog Communications Systems**. 3. ed. New York: Oxford University Press, 1998.
- MADHOW, U. **Fundamentals of Digital Communication**. New York: Cambridge University Press, 2008.
- MUSSOI, F. L. R. **Resposta em Freqüência Filtros Passivos**. Florianópolis: Centro Federal de Educação Tecnológica de Santa Catarina, 2004.
- TEXAS INSTRUMENTS. **SN74HC4066 Quadruple bilateral analog**, 2003.

APÊNDICE A

```
#include <at89x52.h>

void main(){

    char H_count = 0;

    TMOD &= 0x02; /* Timer 0 mode 2*/

    TH0 = 0x00; /* init values */
    TLO = 0x00;
    TR0 = 0;
    ETO=1; /* enable timer0 interrupt */
    EA=1; /* enable interrupts */
    TR0=1; /* timer0 run */

    while(1){

        while(P1_0 == 1);
        while(P1_0 == 0);
        TLO = 0x00;
        while(P1_0 == 1);
        while(P1_0 == 0);

        H_count = TLO;

        if(H_count > 17)
            P2_7 = 0;
        else
            P2_7 = 1;

    }
}
```