



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E
ELETRÔNICA

Projeto de um demonstrador utilizando o HBC como padrão de comunicação

Monografia submetida ao curso de
Engenharia Eletrônica da Universidade
Federal de Santa Catarina como parte dos
requisitos para a aprovação na disciplina
EEL7806 - Projeto Final TCC

Kaléo Turnes Silvestri

Orientador: Prof. Fernando Rangel de Sousa, PhD.

Florianópolis, 8 de fevereiro de 2018.

KALÉO TURNES SILVESTRI

**PROJETO DE UM
DEMONSTRADOR UTILIZANDO
O HBC COMO PADRÃO DE
COMUNICAÇÃO**

Monografia submetida ao curso de Engenharia Eletrônica da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito para aprovação da disciplina EEL7806 - Projeto Final TCC.
Orientador: Prof. Fernando Rangel de Sousa, Ph.D.

**FLORIANÓPOLIS
2017**

**Projeto de um demonstrador utilizando o HBC como padrão
de comunicação**

Kaléo Turnes Silvestri

Esta monografia foi julgada no contexto da disciplina

EEL7806 - Projeto Final TCC

E aprovada na sua forma final pelo

Curso de Engenharia Eletrônica

Banca Examinadora:



Prof. Fernando Rangel de Sousa, Dr.
(Orientador)



Maicon Deivid Pereira, Dr.



Roddy Alexander Romero Antayhua, MSc.

RESUMO

A necessidade transmitir informação sem-fio ao longo dos anos gerou uma demanda por tecnologias que satisfizessem tal necessidade. Muitas tecnologias foram criadas e estudadas, sendo o Bluetooth, o ZigBee e a LoRA apenas algumas delas. Dentro desse grupo existe também o HBC, que foi proposto em 1995 e prevê a transmissão de informação utilizando o corpo humano como meio. Este trabalho se propõe a estudar o uso do HBC para esse fim.

Primeiro foi feito um apanhado geral sobre as características do canal, muito do qual foi extraído de [6], [2] e [8]. Foi então proposto um circuito consistindo de dois grandes blocos: Transmissor e Receptor. Cada um desses blocos foi projetado e prototipado. O transmissor consiste em um microcontrolador para gerar a informação, um misturador, um amplificador e um filtro. No receptor há alguns filtros, um amplificador e outro misturador. Ao final, mostra-se que o HBC pode ser utilizado como meio de transmissão. É demonstrada a transmissão de um sinal de um eletrodo localizado no pulso até outro localizado no antebraço. Fazem-se considerações sobre as limitações do canal, como a faixa de frequência e a necessidade da isolação entre as referências do transmissor e do receptor.

Palavras-chave: Comunicação, HBC, Transmissor, Receptor, Sem-fio

Lista de Figuras

2.1	Classificação simplificada dos tipos de rede sem-fio	6
2.2	Acoplamento Galvânico(a) e Acoplamento Capacitivo(b)	8
2.3	Acoplamento capacitivo em diferentes distâncias de propagação	9
2.4	Acoplamento capacitivo em diferentes pessoas	10
2.5	Acoplamento capacitivo com diferentes tipos de eletrodo	10
3.1	Diagrama de Blocos	12
3.2	Vista interna SA602a	14
3.3	Configuração do oscilador interno como Colpitts	15
3.4	Implementação do Misturador	16
3.5	Simulação Mixer.	16
3.6	Projeto Filtro	19
3.7	Filtro - Resposta em Frequência.	19
3.8	Topologia do amplificador de Saída	20

3.9	Curva Icc Vs. Vce - 2N2222	22
3.10	Amplificador de Saída	24
3.11	Amplificador - Saída(Laranja) e Entrada(Azul)	24
3.12	Resposta em Frequência - Amplificador de Saída	25
3.13	Amplificador de Entrada - Esquemático.	28
3.14	Amplificador de Entrada - Resultado da simulação	28
3.15	Amplificador de Entrada - Resposta em frequência.	29
3.16	Filtro de saída - Esquemático.	30
3.17	Filtro de saída - Resposta em frequência.	30
3.18	Esquemático - Transmissor	31
3.19	Esquemático - Receptor	32
4.1	Arduinos utilizados no projeto. UNO(Esq.) e MEGA(Dir.)	34
4.2	Protótipo 2 - Transmissor	35
4.3	Protótipo 2 - Receptor	35
4.4	Eletrodos utilizados.	36
4.5	Medida - Setup.	37
4.6	Medida - Sinal de entrada	37
4.7	Medida - Saída do modulador.	38
4.8	Medida - Saída do modulador filtrada.	39
4.9	Medida - Saída do transmissor.	39
4.10	Medida - Entrada do receptor.	40
4.11	Medida - Entrada do demodulador.	41
4.12	Medida - Saída do demodulador	42
4.13	Medida - Sinal de saída.	43
4.14	Comparação Sinal de entrada e Saída.	43
7.1	Projeto do protótipo 2 - TX	54
7.2	Projeto do protótipo 2 - RX	54

Lista de Abreviaturas

FSK *Frequency Shift Keying*

HBC *Human Body Communication*

IBC *Intrabody Communication*

PLL *Phase Locked Loop*

PWM *Pulse-Width Modulation*

WBAN *Wireless Body Area Network*

WLAN *Wireless Local Area Network*

WPAN *Wireless Personal Area Network*

WWAN *Wireless Wide Area Network*

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Motivação	1
1.2	Objetivos	2
1.2.1	Objetivos Específicos	2
1.3	Organização do Trabalho	2
2	Fundamentação Teórica	5
2.1	Transmissão de Sinal	5
2.1.1	HBC	6
3	Implementação	11
3.1	Visão geral do projeto	11
3.2	Transmissor	12
3.2.1	MCU	12
3.2.2	Mixer	13
3.2.3	Filtro	17
3.2.4	Amplificador de Saída	20

3.3	Receptor	25
3.3.1	Filtro de entrada	26
3.3.2	Amplificador de entrada	26
3.3.3	Mixer	27
3.3.4	Filtro	27
3.4	Circuito completo	31
4	Resultados	33
4.1	Prototipação	33
4.2	Medidas	36
5	Discussão dos Resultados	45
5.1	Discussão	45
5.2	Futuras melhorias	46
6	Considerações Finais	49
6.1	Conclusão	49
6.2	Trabalhos futuros	49
7	Anexo	53

CAPÍTULO 1

Introdução

1.1 Motivação

Com o advento das tecnologias *sem-fio* muitas coisas antes consideradas exclusivas de filmes de ficção científica se tornaram realidade. Hoje é possível controlar uma casa inteira apenas utilizando o celular e trocar qualquer tipo de informação sem a necessidade de de uma conexão por fios. Tais avanços só foram possíveis graças a procura de pesquisadores ao redor do mundo para encontrar modos mais rápidos, mais seguros e melhores de se transmitir informação.

O HBC nasceu dessa busca. Ele foi proposto em 1995 por Zimmerman [9] como um método de transmissão de sinal sem-fio e foi inicialmente chamado de IBC (*Intrabody communication*). A proposta desse trabalho é desenvolver um circuito que utilize o HBC como meio de comunicação.

1.2 Objetivos

O objetivo principal é demonstrar o uso do HBC e sua possível utilização para a transmissão de informações.

1.2.1 Objetivos Específicos

- Definir a frequência de transmissão
- Definir a estrutura do transmissor e do receptor
- Escolher os transistores
- Definir as topologias dos amplificadores
- Definir a modulação, bem como a implementação da mesma
- Projetar os filtros
- Prototipar o projeto

1.3 Organização do Trabalho

No capítulo 2 é apresentada a fundamentação teórica considerada necessária para o entendimento deste trabalho.

No capítulo 3 são ilustradas e descritas as implementações do projeto e sua metodologia.

No capítulo 4 é mostrada como foi feita a prototipação dos circuitos projetados no capítulo 3.

No capítulo 5 são mostrados os resultados obtidos com o protótipo do projeto.

No capítulo 6 é apresentada a discussão dos resultados, pontuando alguns dos empecilhos encontrados ao longo do projeto.

No capítulo 7 é concluído o trabalho e discutem-se os planos para o futuro.

CAPÍTULO 2

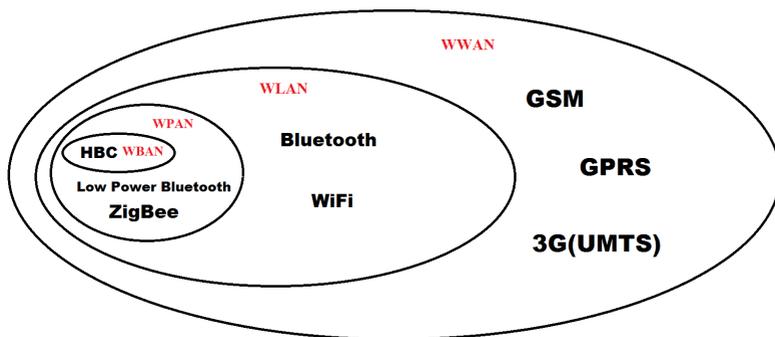
Fundamentação Teórica

2.1 Transmissão de Sinal

Diversos métodos de envio de ondas de rádio foram desenvolvidos ao longo dos anos, alguns para envio através de grandes distâncias, outros para comunicação doméstica. Para que se pudesse categorizar tais tipos, foi criada uma nomenclatura. Alguns exemplos dessa nomenclatura são: WWAN(*Wireless Wide Area Network*) para comunicações a grandes distâncias, WLAN(*Wireless Local Area Network*) para comunicação na esfera doméstica e, recentemente, WPAN(*Wireless Personal Area Network*) que denomina a comunicação feita ao redor do corpo do usuário. A Figura 2.1 contém uma ilustração de algumas das tecnologias enquadradas em cada categoria.

O HBC, tema deste trabalho, tem sido enquadrado em

Figura 2.1: Classificação simplificada dos tipos de rede sem-fio



Fonte: Própria

um grupo novo chamado WBAN(*Wireless Body Area Network*). O termo WBAN é recente, e agrupa redes que ficam contidas ao corpo humano, ou seja, distâncias ainda menores que em WPANs.

2.1.1 HBC

O HBC foi proposto pela primeira vez por [9], mas não recebeu muita atenção na época. Foi só mais tarde, com o florescimento das tecnologias *sem-fio*, que o HBC voltou a ser estudado como padrão de comunicação.

Quando comparado a outros métodos de comunicação *sem-fio*, como o ZigBee e o Bluetooth, o HBC apresenta vantagens e desvantagens. Ele é mais seguro, pois mantém o sinal contido na área próxima ao corpo, e consome menos potência, pois não precisa do *front-end* de radiofrequência que consome muita potência e é necessário aos outros métodos de comunicação [4]. Sua principal vantagem também é sua

desvantagem, já que o sinal só se propaga junto ao corpo, o contato é necessário para a sua utilização.

Quanto ao funcionamento, o HBC geralmente pode ser dividido em dois grandes grupos: Acoplamento Galvânico e Acoplamento Capacitivo. Ambos utilizam dois eletrodos em cada ponto do circuito, transmissor e receptor.

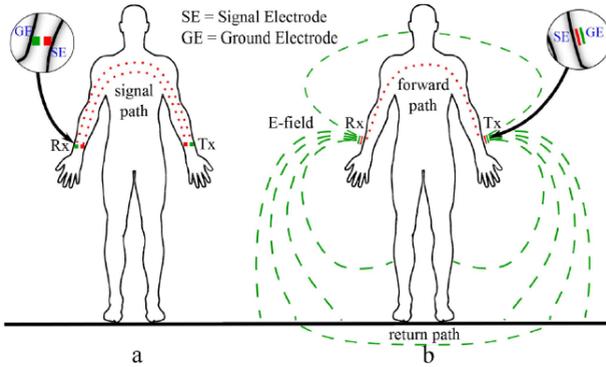
No acoplamento galvânico, tanto o eletrodo de sinal quanto o de referência ficam em contato com o corpo. O sinal é transmitido por correntes galvânicas que são induzidas por dentro do mesmo. Como o circuito de transmissão do acoplamento galvânico é interno ao corpo, ele pode ser utilizado para circuitos implantáveis [9].

No acoplamento capacitivo, o eletrodo de sinal é posto em contato com o corpo enquanto o eletrodo de referência é deixado flutuando, isto é, sem estar em contato direto com alguma coisa além do ar. O sinal é transmitido pela perturbação do campo elétrico gerada pelo par de eletrodos em acoplamento com o corpo e com o terra. O sinal então se propaga pela superfície do corpo e retorna pelo acoplamento do eletrodo de referência com o terra. A necessidade desse caminho de retorno fez com que, até recentemente, se considerasse o acoplamento capacitivo inutilizável para circuitos implantáveis. Recentes estudos, no entanto, mostram que o acoplamento capacitivo pode ser utilizado em circuitos implantáveis [5].

Na Figura 2.2 é ilustrada a diferença entre os acoplamentos.

As diferenças entre os acoplamentos vão além da posição dos eletrodos. O acoplamento galvânico tem uma banda de operação pequena, até 1 MHz, e sofre muitas perdas com o aumento da distância [6]. O acoplamento capacitivo tem um

Figura 2.2: Acoplamento Galvânico(a) e Acoplamento Capacitivo(b)

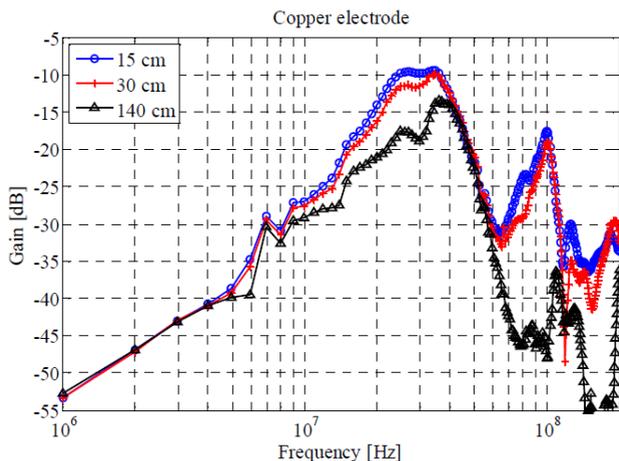


Fonte:[6]

comportamento passa-banda, como pode ser observado na Figura 2.3. Sua banda de operação é dependente da intensidade do campo elétrico gerado pelos eletrodos e é limitada em 100 MHz. Nessa frequência o tamanho do corpo passa a ser grande o suficiente para servir como antena e o sinal passa a ser irradiado para fora do mesmo [6]. Na Figura 2.3 também pode ser observado que o acoplamento capacitivo não sofre muitas perdas com o aumento da distância de propagação, fato que pode ser explicado pelo fato do sinal se propagar pela superfície do corpo, que é uniforme quando comparada a parte interna no mesmo.

No que se refere ao comportamento com diferentes pessoas, o acoplamento capacitivo é superior, já que faz pouca distinção de altura ou peso, como pode ser observado na Figura 2.4 [6]. Isso se deve ao fato do sinal não se propagar por dentro do corpo, mas por sua superfície. Já o galvânico sofre com essa diferença, pois as correntes galvânicas são induzi-

Figura 2.3: Acoplamento capacitivo em diferentes distâncias de propagação

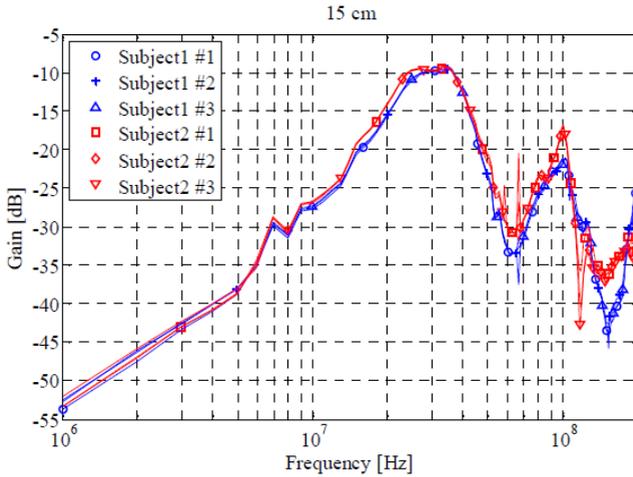


Fonte: [6]

das por dentro do corpo. As variações de massa muscular e gordura mudam o meio no qual o sinal se propaga e causam uma atenuação maior [3].

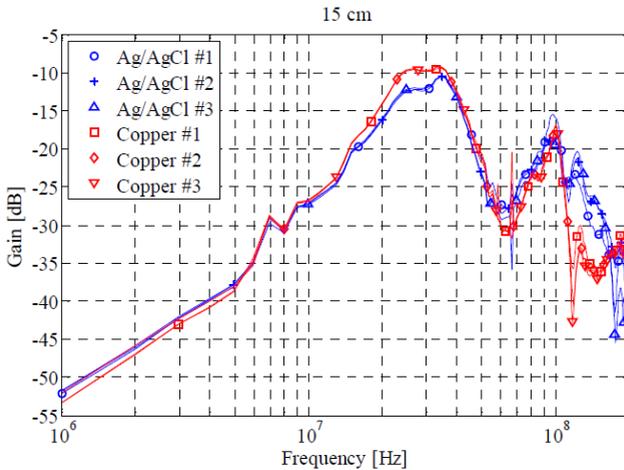
Quanto aos eletrodos pode ser mostrado que, para o acoplamento capacitivo, não há diferença entre um eletrodo específico para fins biomédicos e um eletrodo de cobre, como é ilustrado na Figura 2.5. O contato do eletrodo com a pele é de extrema importância, uma vez que a superfície de contato define o acoplamento com o corpo [6].

Figura 2.4: Acoplamento capacitivo em diferentes pessoas



Fonte: [6]

Figura 2.5: Acoplamento capacitivo com diferentes tipos de eletrodo



Fonte: [6]

CAPÍTULO 3

Implementação

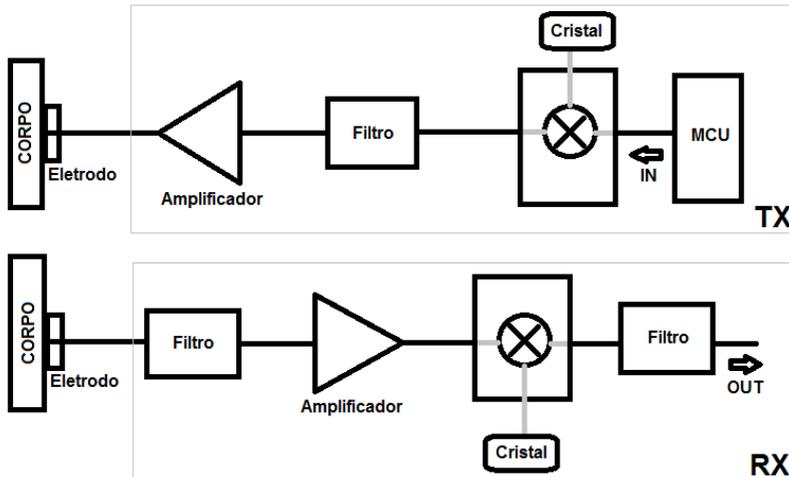
3.1 Visão geral do projeto

O projeto do transceptor para demonstrar o uso da HBC como meio de comunicação foi dividido em duas partes: Transmissor e Receptor. A Figura 3.1 contém o diagrama de blocos do projeto.

Na primeira parte, o transmissor, utiliza-se o MCU para gerar um onda quadrada de 30 kHz. Esse sinal é injetado em um mixer(Sa602a) que faz a translação da frequência para 20 MHz. O sinal transladado é então filtrado para que apenas a componente de 20 MHz seja transmitida. Por último o sinal é amplificado e enviado pelo corpo.

Na segunda parte, o receptor, o sinal é recebido é primeiramente filtrado, para que se elimine o ruído proveniente do meio. Esse é então amplificado para que possa ser inje-

Figura 3.1: Diagrama de Blocos



Fonte: Própria

tado no mixer e tenha sua frequência transladada novamente para o valor original. O sinal de é filtrado para se eliminem suas componentes indesejadas. Ao final obtém o mesmo sinal gerado pelo MCU na primeira etapa.

3.2 Transmissor

3.2.1 MCU

Para gerar o sinal de informação foi utilizado o microcontrolador ATMEGA328, programado na placa Arduino UNO. A escolha do microcontrolador se deveu ao fato do mesmo ser de fácil acesso e possuir ampla documentação online.

Para gerar o sinal foi utilizado o gerador de PWM do próprio ATMEGA328. Esse gerador altera a largura do pulso

de saída de acordo com um parâmetro definido pelo usuário. Para que a saída fosse uma onda quadrada esse parâmetro foi travado em 0.5, o que fez com que o gerador produzisse uma onda quadrada com *duty cycle* de 50 por cento na frequência-base do ATMEGA328.

A modulação escolhida foi a FSK, que consiste em modificar a frequência do sinal de informação para diferenciar dois ou mais níveis binários. A escolha de tal modulação foi também influenciada pelo fato do ATMEGA368 permitir a alteração de sua frequência-base com relativa facilidade. Desse modo foi possível gerar um sinal de frequência 30 kHz para reproduzir um '0' binário e um outro sinal de 60 kHz para um '1' binário. Em primeira instância apenas o sinal de 30 KHz foi gerado, para aferir a comunicação através do canal.

A amplitude do sinal de saída teve que se diminuída externamente pois o ATMEGA328 não permite o seu controle no modo como foi utilizado. A saída do Arduino UNO é um sinal 5 Volts de amplitude e este foi reduzido para 100 miliVolts através de um divisor resistivo. Tal amplitude foi escolhida para que o sinal não saturasse o mixer, cuja entrada possui alta sensibilidade(ver tabela 3.1).

3.2.2 Mixer

Como mixer foi escolhido o circuito integrado *sa206a*, que conta com um oscilador interno cuja frequência pode ser definida externamente. Na tabela 3.1 são mostrados os parâmetros do *sa602a*. Na Figura 3.2 é ilustrado o diagrama de blocos interno do *sa602a*.

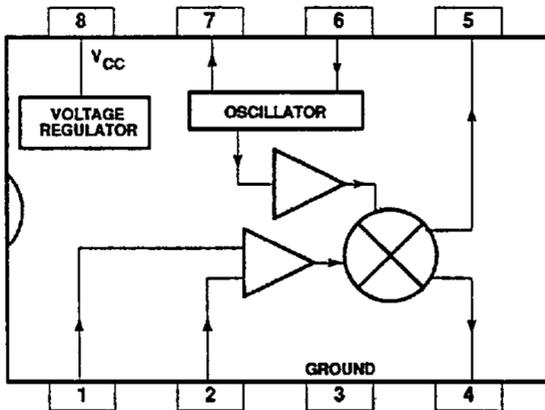
Para definir a frequência do oscilador local do mixer foi

Tabela 3.1: Parâmetros sa602a.

Parâmetro	Valor	Unidade
Tensão de operação	4.5 - 8	V
Consumo de corrente DC	2.4	mA
Figura de Ruído [Em 45 MHz]	5	dB
Resistência de Entrada	1.5	kOhm
Capacitância de Entrada	3	pF
Resistência de Saída	1.5	kOhm
Sensibilidade [Para sinais com SNR = 12 dB]	-119	dBm

Fonte: Adaptado de [7].

Figura 3.2: Vista interna SA602a

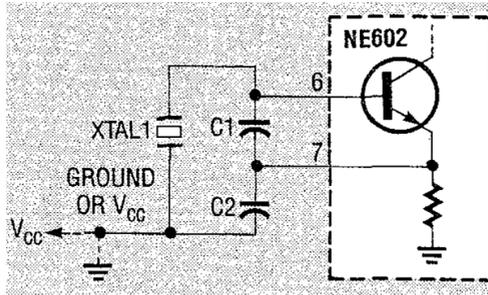


Fonte: [7]

utilizada uma configuração Colpitts a cristal sugerida em [7]. Na Figura 3.3 é mostrada tal configuração.

A frequência de 20 MHz foi escolhida por estar perto da

Figura 3.3: Configuração do oscilador interno como Colpitts

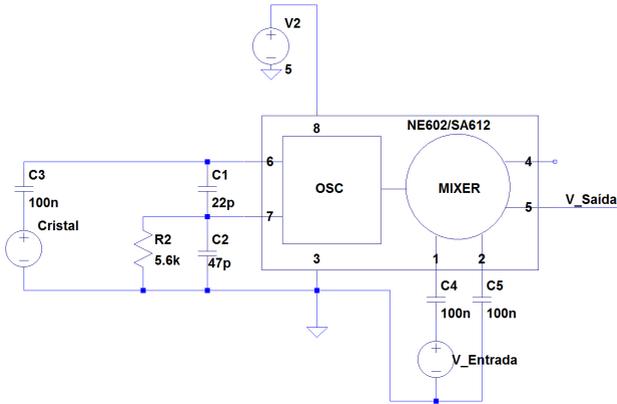


Fonte: [7]

banda-passante do corpo humano, como mostrado em [6]. Outra razão para sua escolha foi o fato de que os cristais acima de 20 MHz serem cristais de sobre-tom e componentes adicionais precisarem ser adicionados para permitir sua utilização [7]. Uma importante característica do *sa602a* é o fato de este possuir uma sensibilidade muito alta para sinais de entrada, o que muda a premissa do design do amplificador do receptor, já que se pode optar pelo baixo-ruído em detrimento do ganho.

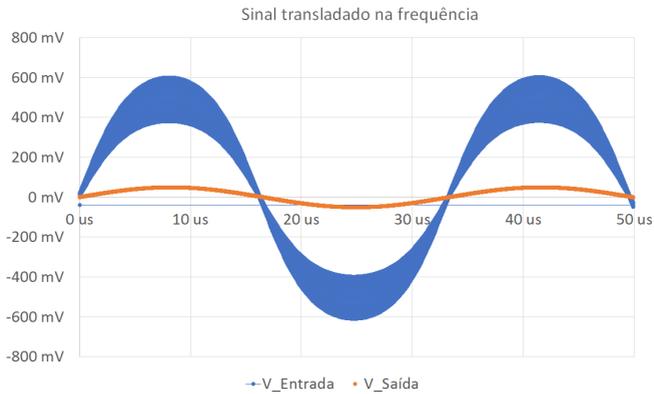
Na Figura 3.5 é mostrado o resultado de uma simulação do *sa602a*. O circuito simulado foi o ilustrado na Figura 3.4. O sinal de entrada é uma onda senoidal de 30 KHz e o oscilador local foi configurado para 20 MHz. O sinal de saída é um sinal de 30 KHz transladado para 20 MHz.

Figura 3.4: Implementação do Misturador



Fonte: Própria

Figura 3.5: Simulação Mixer.



Fonte: Própria

3.2.3 Filtro

O filtro utilizado na saída do mixer foi projetado para ser um passa-banda e foi implementado com um capacitor e um indutor conectados em série, como visto na Figura 3.6a. A frequência central do filtro foi definida como 20 MHz, sendo esta para a qual o sinal de 30 KHz foi transladado. Para projetar o filtro foi escolhido o valor do indutor, $4.7\mu\text{H}$, e utilizou-se a equação de ressonância para definir o valor do capacitor:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (3.1)$$

O valor encontrado foi 13.47 pF e este foi implementado associando-se dois capacitores de 6.8 pF em paralelo.

Um parâmetro utilizado para qualificar filtros é o fator de qualidade Q. Este pode ser calculado através da equação:

$$Q = \frac{2\pi f_0 L}{R} \quad (3.2)$$

Essa é a equação para um circuito RLC série e condiz com o filtro implementado. A carga do filtro, o fator R, é impedância de entrada do amplificador e pode ser calculada através da equação:

$$Z_{in} = \beta \frac{\phi_t}{I_{e1} + R_e} \quad (3.3)$$

A equação leva em consideração o circuito simplificado da Figura 3.6b. O cálculo da impedância de entrada supõe um sinal AC, então o capacitor Cd é considerado um curto-

circuito e o indutor Ld um circuito aberto. Aplicando-se a impedância de entrada na equação 3.2 obtém-se fator Q do filtro. Com o fator de qualidade, pode-se calcular a largura de banda do filtro através de:

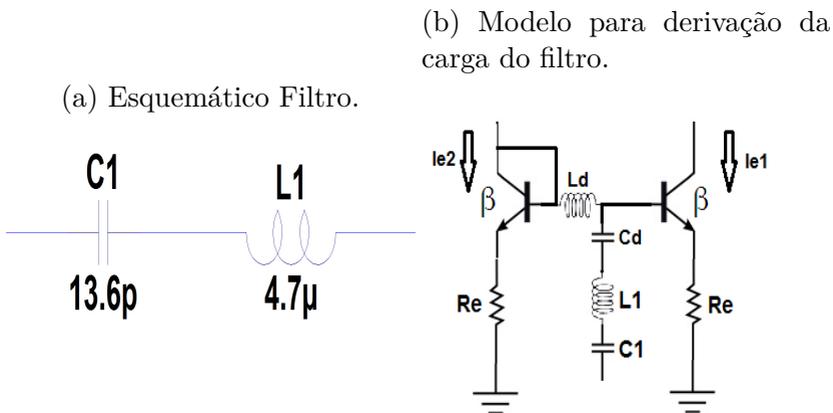
$$Q = \frac{f_0}{W} \quad (3.4)$$

Sendo Q o fator de qualidade do filtro, f_0 a frequência de centro e W a largura de banda.

O filtro projetado possui um fator de qualidade 0.29 e uma largura de banda de 67 MHz.

Os valores são apenas aproximados pois a ESR dos componentes do filtro não é considerada. A ESR pode ser inserida na simulação para verificar o erro na frequência central do filtro. O uso de componentes com baixa ESR torna o filtro implementado próximo do filtro projetado. Na Figura 3.7 é mostrada a resposta em frequência do filtro simulado.

Figura 3.6: Projeto Filtro



Fonte: Própria

Figura 3.7: Filtro - Resposta em Frequência.

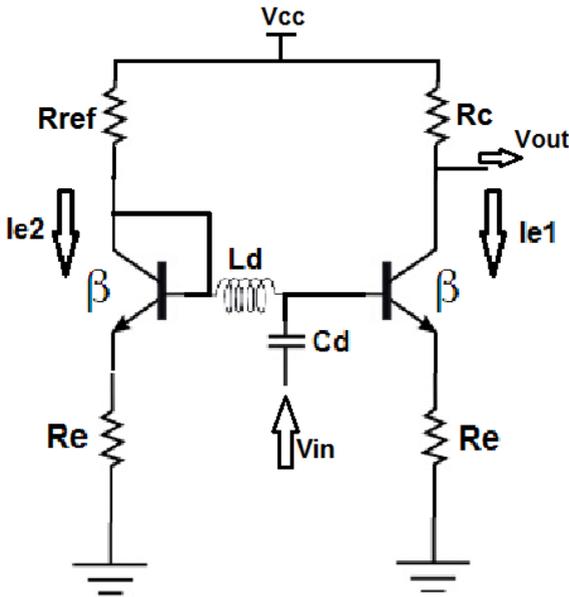


Fonte: Própria

3.2.4 Amplificador de Saída

A topologia escolhida foi um amplificador classe A em configuração emissor comum degenerado e o transistor utilizado foi o BJT *MMBT2222A*. Na Figura 3.8 é ilustrada a topologia.

Figura 3.8: Topologia do amplificador de Saída



Fonte: Própria

Os parâmetros do transistor estão definidos na tabela 3.2.

A primeira etapa do projeto foi definir a polarização do transistor. A corrente de 10 mA foi escolhida para que o consumo de potência do amplificador ficasse abaixo de 100 mW. O resistor de coletor R_c foi definido para que sua queda de tensão fosse metade da alimentação. O resistor de degenera-

Tabela 3.2: Parâmetros MMBT2222A.

Parâmetro	Valor	Unidade
Ganho de corrente DC [$I_c = 10 \text{ mA}$]	75	-
Tensão de Saturação Coletor-Emissor	300	mV
Tensão de Saturação Base-Emissor	1.2	V
Frequência de Transição	300	MHz
Figura de Ruído [1 KHz]	4	dB

Fonte: Adaptado do datasheet.

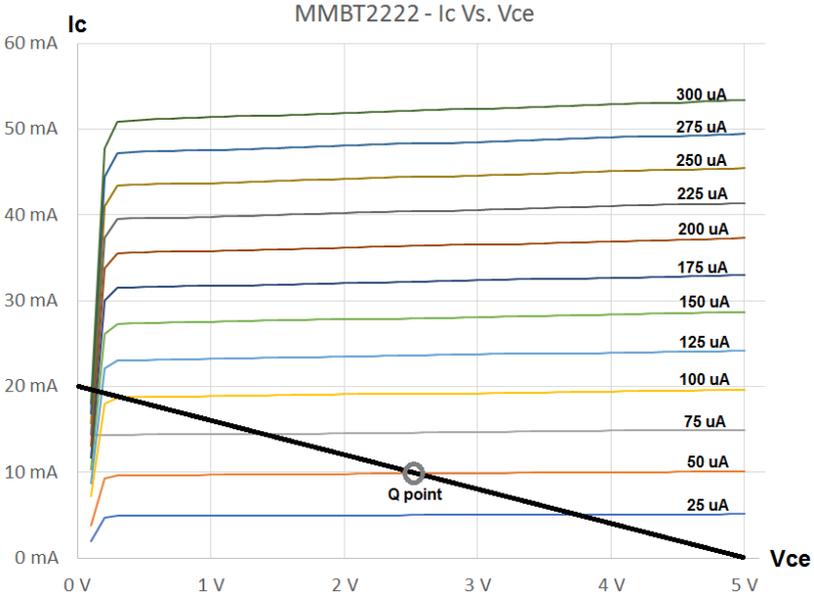
ção de emissor R_e foi escolhido para que sua queda de tensão fosse 10 por cento da tensão de alimentação. Esses valores polarizam o transistor para o meio da tensão de alimentação DC, o que permite que sua operação AC não o faça entrar em saturação. Utilizando-se os valores para calcular a curva de carga no gráfico I_{cc} Vs. V_{ce} da Figura 3.9 é possível garantir que o transistor esteja operando na região ativa com a corrente de coletor que foi selecionada.

A segunda etapa do projeto foi fornecer a corrente para a base do transistor. Para isso foi utilizada a topologia de espelho de corrente. O resistor de referência R_{Ref} foi calculado aplicando-se a lei das correntes de Kirchhoff ao transistor Q1. O componentes de desacoplamento L_d e C_d foram escolhidos para que as partes AC e DC do amplificador ficassem separadas. O ganho do amplificador pode ser calculado pela equação:

$$A_v = \left| \frac{-g_m R_c}{1 + g_m R_e} \right| \quad (3.5)$$

O amplificador de saída deve ter uma ganho elevado, pois

Figura 3.9: Curva I_{cc} Vs. V_{ce} - 2N2222



Fonte: Própria

Tabela 3.3: Parâmetros finais do amplificador de Saída.

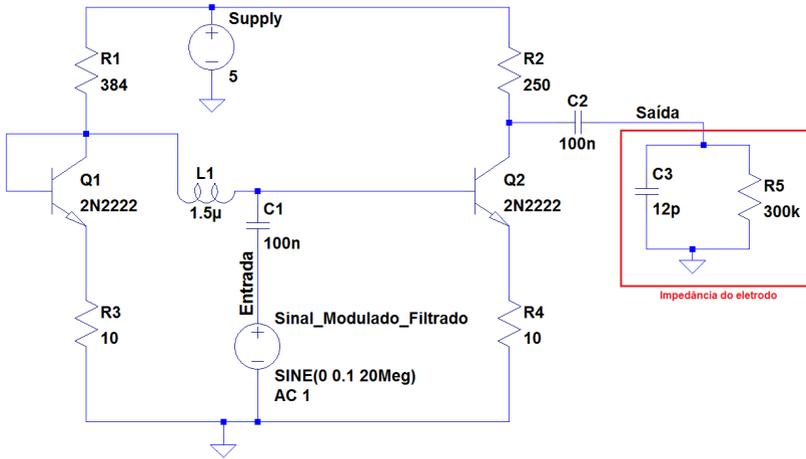
Parâmetro	Valor	Unidade
Tensão de alimentação	5	V
Corrente de coletor	10	mA
R_c	250	Ω
R_e	10	Ω
L_d	1.5	μH
C_d	100	nF
Ganho AC	26	dB
Banda	25	MHz
Tensão do sinal de entrada simulado	100	V_{pp}

Fonte: Própria

é o último bloco do sistema antes da transmissão do sinal pelo corpo. Utilizando-se a equação 5, ajustou-se o valor de R_e para que o ganho do amplificador fosse de 26 dB. A escolha do ganho foi baseada no estudo do canal feito em [6]. Os parâmetros finais do amplificador de saída constam na tabela 3.3.

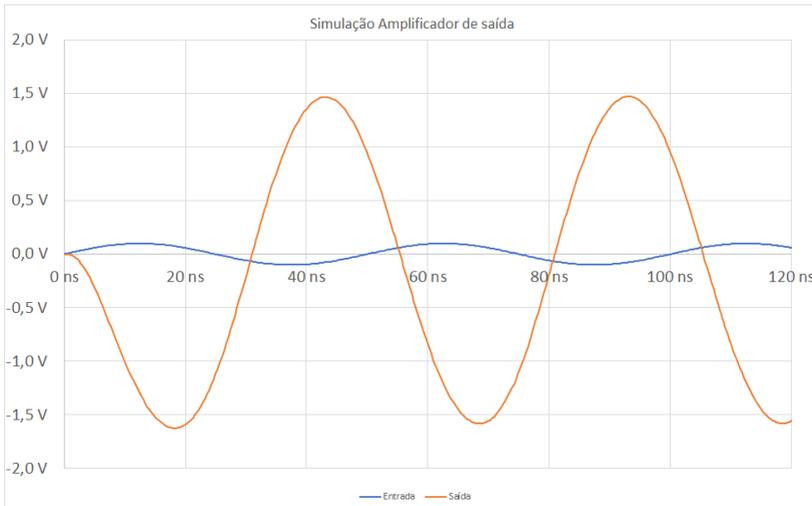
O amplificador foi então simulado como na Figura 3.10. O software utilizado na simulação foi o LTSpice IV e foram feitas simulações de transiente e no domínio da frequência. Nas Figuras 3.11 e 3.12 constam as simulações no domínio do tempo e da frequência, respectivamente.

Figura 3.10: Amplificador de Saída



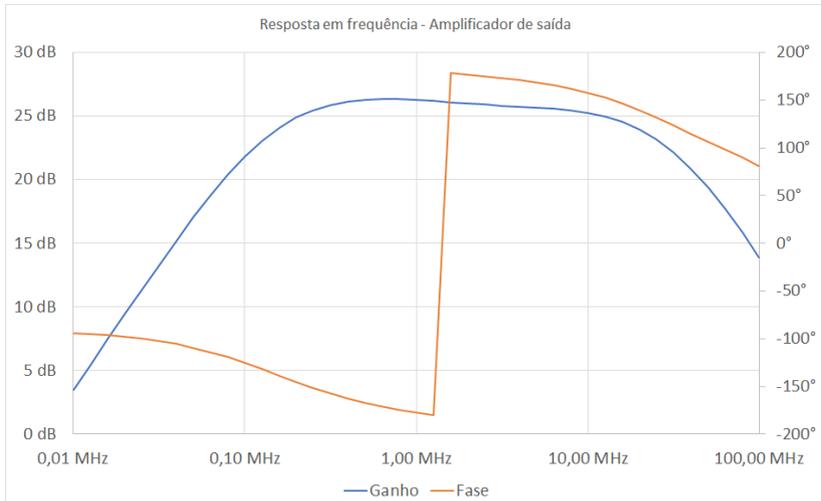
Fonte: Própria

Figura 3.11: Amplificador - Saída(Laranja) e Entrada(Azul)



Fonte: Própria

Figura 3.12: Resposta em Frequência - Amplificador de Saída



Fonte: Própria

3.3 Receptor

Após o sinal ser transmitido pelo corpo este sofre perdas e é submetido a altos níveis de ruído [6]. Por essa razão os primeiros blocos do receptor não podem injetar muito ruído ao sinal. Pela fórmula de *Friis*, o primeiro elemento de uma cadeia de blocos tem maior relevância sobre o ruído total do conjunto [1]:

$$NF = F1 + \frac{F2 - 1}{G1} + \frac{F3 - 1}{G2} \dots \quad (3.6)$$

Por essa razão o primeiro bloco do receptor usualmente é uma amplificador de baixo-ruído. No entanto, como a modulação escolhida para este projeto foi FSK, o nível de ruído não é de fundamental importância uma vez que o mesmo apa-

rece na amplitude. O primeiro bloco do circuito foi um filtro passa-faixas, cujo intuito era filtrar parte do sinal indesejado e fazer com que apenas o sinal modulado fosse amplificado.

3.3.1 Filtro de entrada

O projeto do filtro de entrada foi o mesmo do filtro de saída, uma passa-faixas centrado em 20 MHz.

3.3.2 Amplificador de entrada

O amplificador de entrada não tem a mesma premissa do amplificador de saída. O ganho não é o parâmetro mais importante porque o misturador no qual o sinal vai ser injetado possui alta sensibilidade, -115 dBm(ver tabela 3.1).A topologia utilizada foi a mesma, ilustrada na Figura 3.8. O valor do resistor R_e foi ajustado para que o ganho fosse menor. A carga do amplificador de entrada é a impedância de entrada do misturador R_l (referir a tabela 3.1). O ganho do amplificador é definido pela equação:

$$A_v = \left| \frac{-g_m(R_c // R_l)}{1 + g_m R_e} \right| \quad (3.7)$$

O ganho definido foi 13 dB. Este foi limitado porque a sensibilidade do misturador é alta.

O receptor não compartilha a mesma referência do transmissor. A falta de uma referência bem definida deixa o circuito suscetível ao ruído do ambiente. Por essa razão capacitores de desacoplamento foram adicionados. Tais capacitores tem a função eliminar as flutuações na alimentação do circuito causadas por esses ruídos. Na Figura 3.13 é mostrado o circuito simulado.

Tabela 3.4: Parâmetros finais do amplificador de entrada.

Parâmetro	Valor	Unidade
Tensão de alimentação	5	V
Corrente de coletor	10	mA
R_c	250	Ω
R_e	47	Ω
L_d	1.5	μH
C_d	100	nF
Ganho AC	13	dB
Banda	90	MHz

Fonte: Própria

As Figuras 3.14 e 3.15 contém os resultados das simulações do amplificador de entrada no domínio do tempo e da frequência, respectivamente.

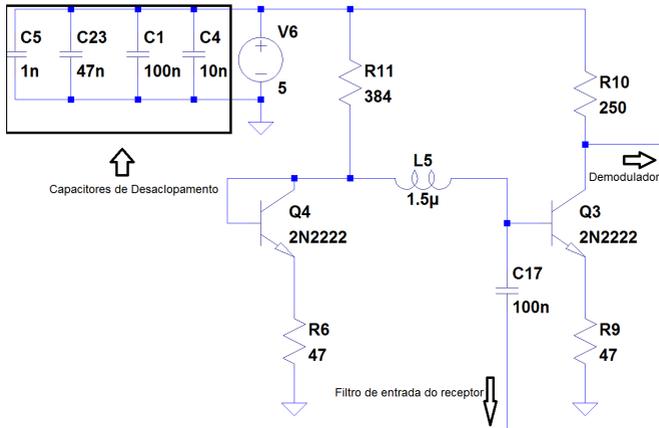
3.3.3 Mixer

Para reverter a translação e deslocar o sinal de informação(30 KHz) de volta para a sua banda o *sa602a* foi novamente utilizado. O oscilador local foi configurado para 20 MHz através da configuração Colpitts, a mesma utilizada no transmissor(ver Figura 3.4).

3.3.4 Filtro

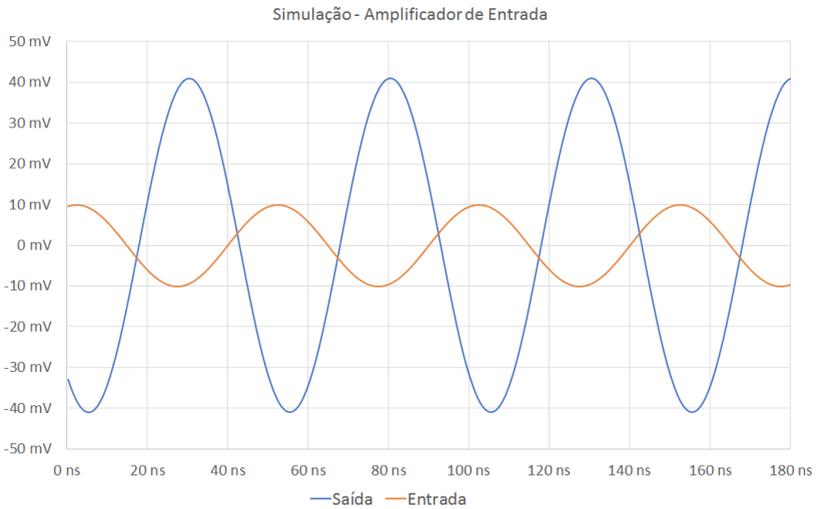
A translação de um sinal na frequência pode ser descrita matematicamente como uma multiplicação de cossenos no domínio do tempo. O sinal modulante é aquele que é trans-

Figura 3.13: Amplificador de Entrada - Esquemático.



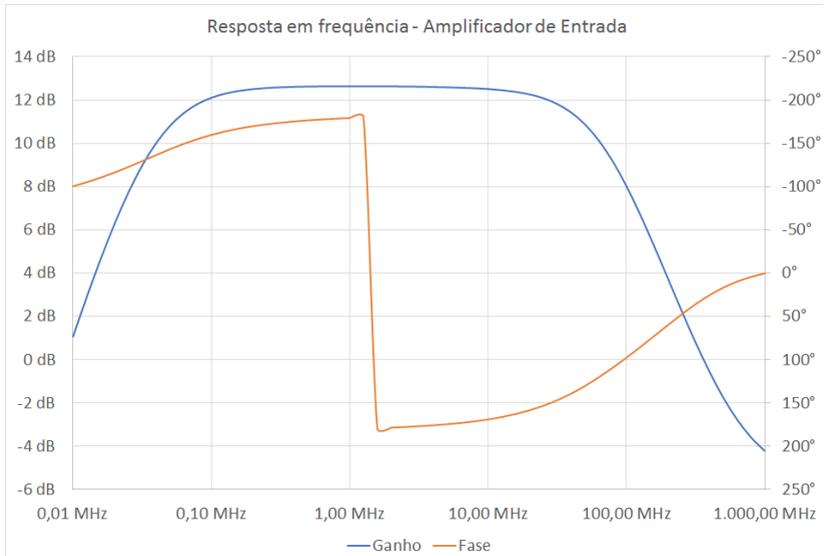
Fonte: Própria

Figura 3.14: Amplificador de Entrada - Resultado da simulação



Fonte: Própria

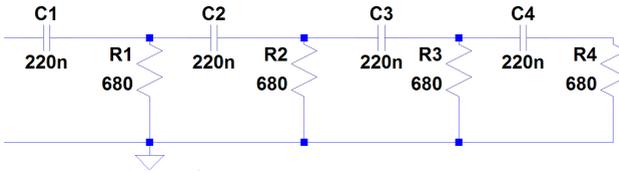
Figura 3.15: Amplificador de Entrada - Resposta em frequência.



Fonte: Própria

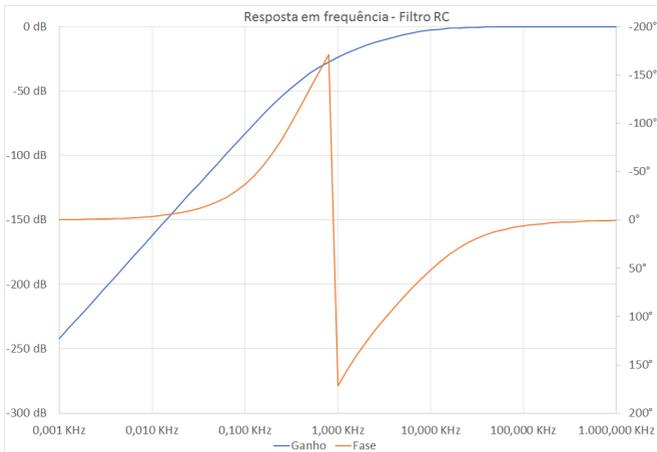
lado e contém a informação. O sinal modulador é aquele para o qual a informação é transladada. Quando se aplica a operação para reverter o translado, o sinal da modulador deve ter a mesma frequência nas duas operações ou haverá uma componente cuja frequência é a diferença entre as mesmas. Tal sinal não é eliminado e aparece junto ao sinal da informação na saída. Este usualmente é um sinal de frequência baixa, pois a diferença entre as frequências dos osciladores locais é pequena. O filtro passa-baixas na saída tem como intuito eliminar o sinal indesejado. O filtro projetado foi um RC de 4ª ordem. A Figura 3.16 contém o esquemático simulado do filtro e a Figura 3.17 sua simulação no domínio da frequência.

Figura 3.16: Filtro de saída - Esquemático.



Fonte: Própria

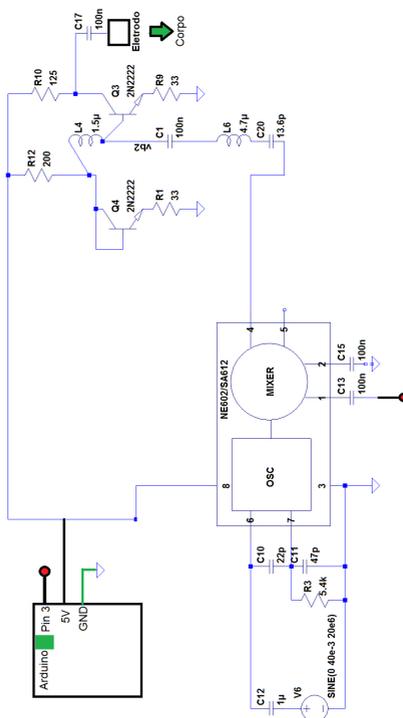
Figura 3.17: Filtro de saída - Resposta em frequência.



Fonte: Própria

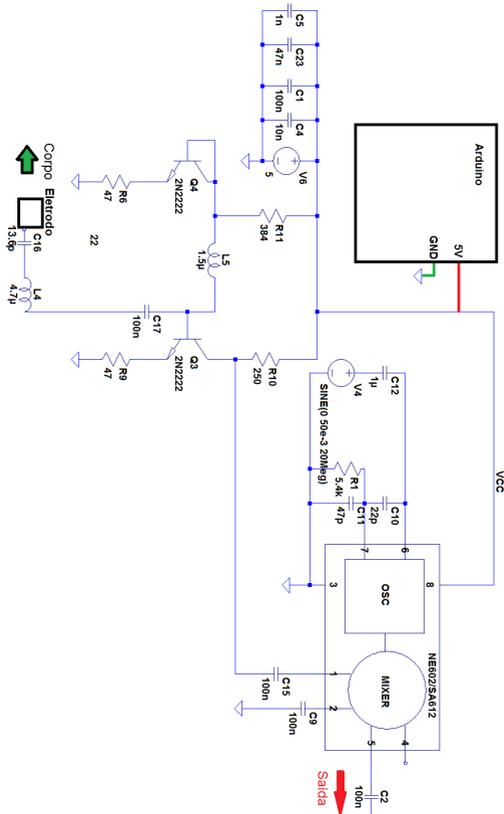
3.4 Circuito completo

Figura 3.18: Esquemático - Transmissor



Fonte: Própria

Figura 3.19: Esquemático - Receptor



Fonte: Própria

CAPÍTULO 4

Resultados

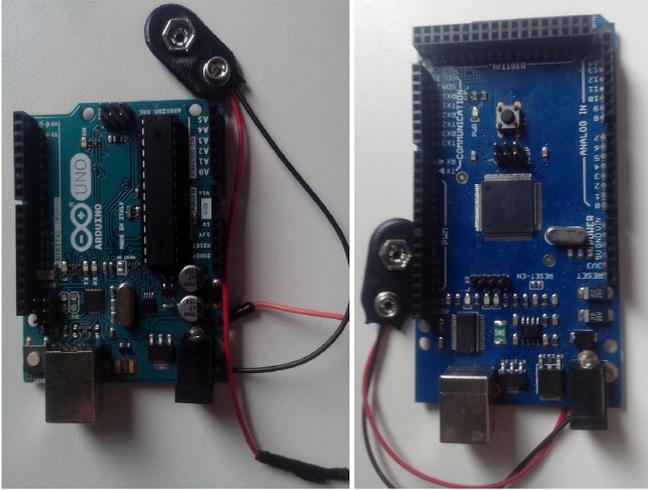
4.1 Prototipação

A Figura 4.1 contém imagens dos dois arduinos utilizados para produzir e ler o sinal transmitido. Idealmente ambos deveriam ser alimentados por baterias, para que o caminho de propagação do sinal seja somente o canal [6]. Para este projeto apenas o receptor foi alimentado por baterias.

Dois protótipos foram realizado para este projeto. O primeiro foi feito em placa-virgem de fenolite, mas seu desempenho não foi satisfatório. O segundo protótipo foi criado em circuito impresso também em placa de fenolite. As figuras 4.2 e 4.3 contém fotos dos segundos protótipos do transmissor e do receptor. No Anexo, há imagens dos projetos da placas impressas dos segundos protótipos.

Na Figura 4.4 é mostrado o tipo de eletrodo utilizado,

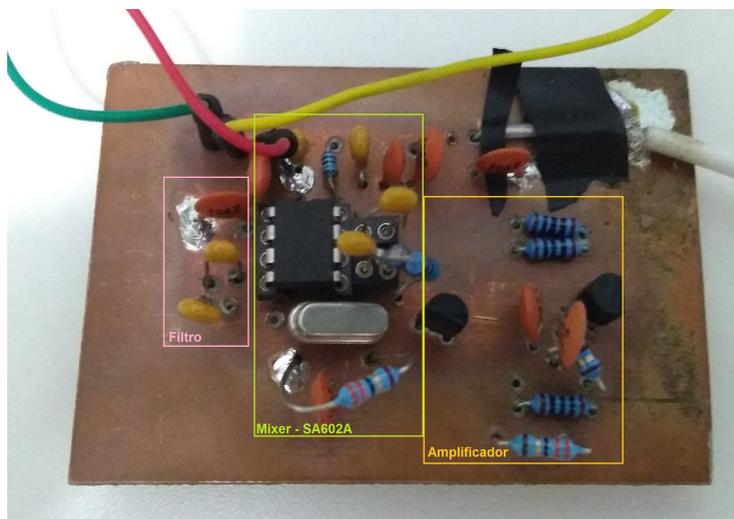
Figura 4.1: Arduinos utilizados no projeto. UNO(Esq.) e MEGA(Dir.)



Fonte: Própria

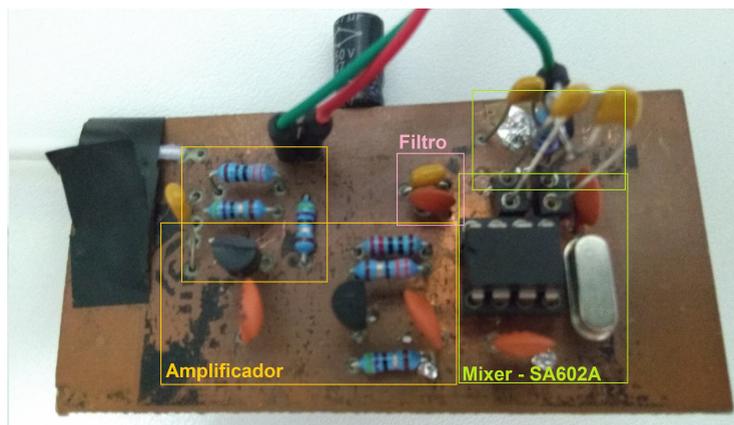
tanto no transmissor como no receptor. Trata-se de dois quadrados de área $2\text{cm} \times 2\text{cm}$ com superfície de cobre, separados por um dielétrico(FR-4).

Figura 4.2: Protótipo 2 - Transmissor



Fonte: Própria

Figura 4.3: Protótipo 2 - Receptor



Fonte: Própria

Figura 4.4: Eletrodos utilizados.

(a) Eletrodo - Lado Sinal

(b) Eletrodo - Lado Terra



Fonte: Própria

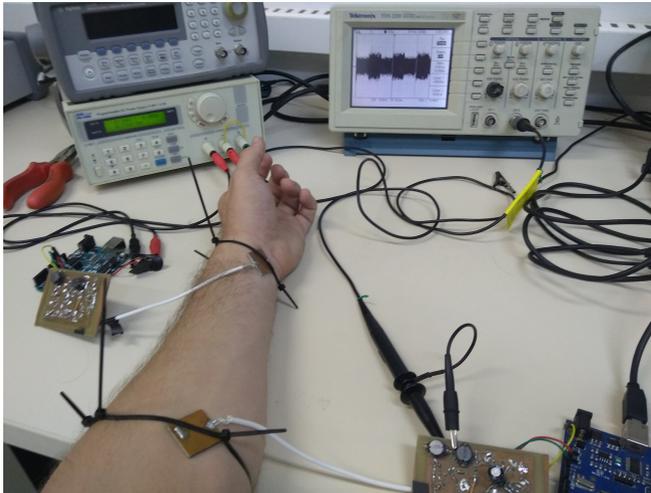
4.2 Medidas

Nesta sessão serão mostrados os resultados obtidos na segunda prototipação. As medidas foram feitas com uma distância de 20 cm entre os eletrodos de transmissão e recepção, ilustrado na Figura 4.5. O eletrodo de transmissão foi colocado no pulso e o de recepção no antebraço. Foi utilizada uma fonte de bancada para alimentar o transmissor, enquanto o receptor foi alimentado por um notebook desconectado da rede elétrica.

Na Figura 4.6 é mostrado o sinal de entrada de 30 KHz e 100 mV_{pp} que é injetado na entrada do misturador do transmissor e representa a informação.

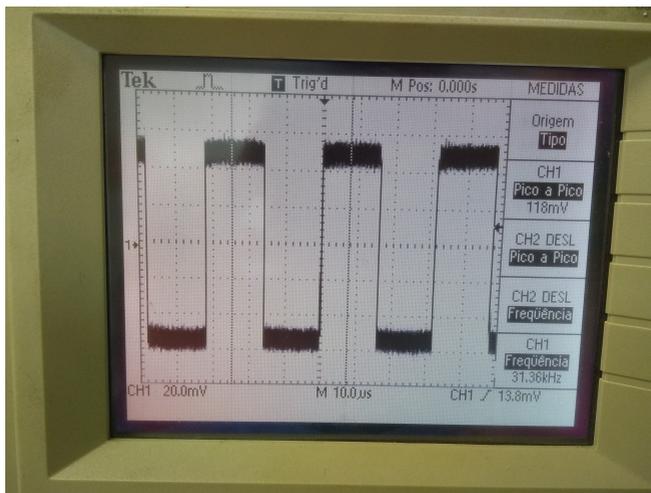
Na Figura 4.7 é mostrado o sinal de saída do misturador do transmissor. O sinal é assimétrico porque o modulador coloca a portadora na saída mesmo quando a modulante é "0", então onde deveria haver "0" ainda existe o sinal da por-

Figura 4.5: Medida - Setup.



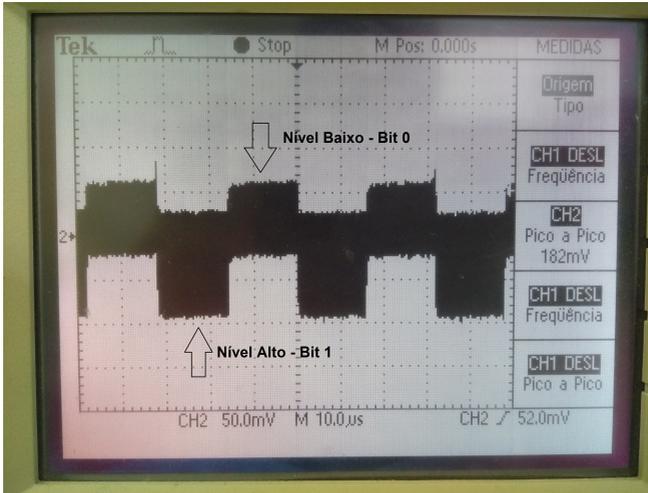
Fonte: Própria

Figura 4.6: Medida - Sinal de entrada



Fonte: Própria

Figura 4.7: Medida - Saída do modulador.



Fonte: Própria

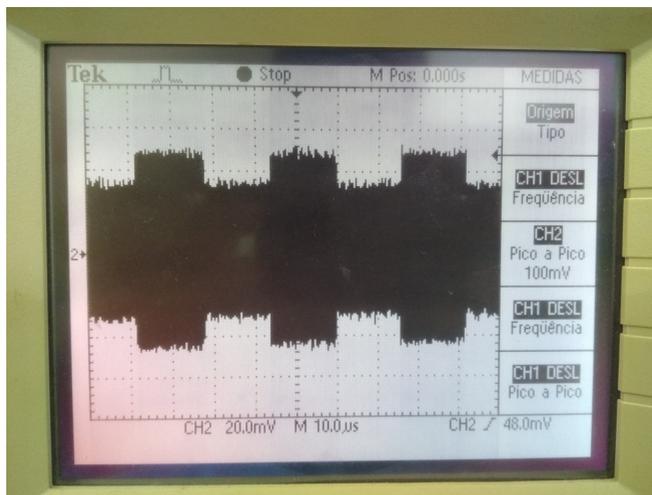
tadora(20 MHz). A saída é invertida com relação ao sinal de entrada(ver Figura 4.6) porque o misturador utiliza uma célula de Gilbert para misturar os sinais. O sinal tem amplitude de $182 mV_{pp}$.

Na Figura 4.8 é mostrada a saída do modulador depois do filtro passa-faixas. A amplitude dos sinal é $100 mV_{[pp]}$.

Na Figura 4.9 é ilustrado o sinal que vai ser enviado pelo canal através do eletrodo. A saída do misturador filtrada é amplificada no amplificador de saída e injetada no eletrodo. A amplitude do sinal é de $460 mV_{pp}$. O sinal possui duas frequências, 30 KHz(informação) e 20 MHz(portadora).

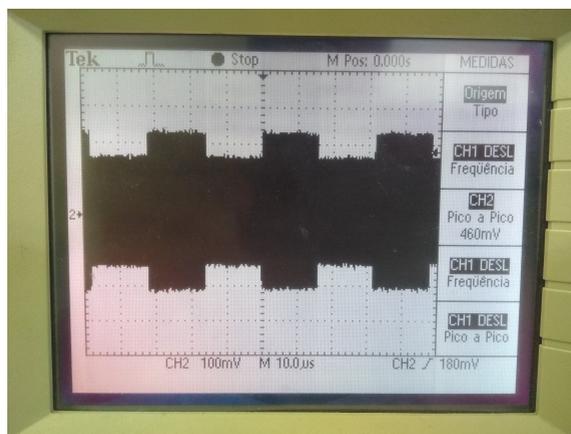
Na Figura 4.10 é mostrado o sinal medido no eletrodo do receptor, durante a transmissão pelo canal. O sinal tem $50 mV_{pp}$.

Figura 4.8: Medida - Saída do modulador filtrada.



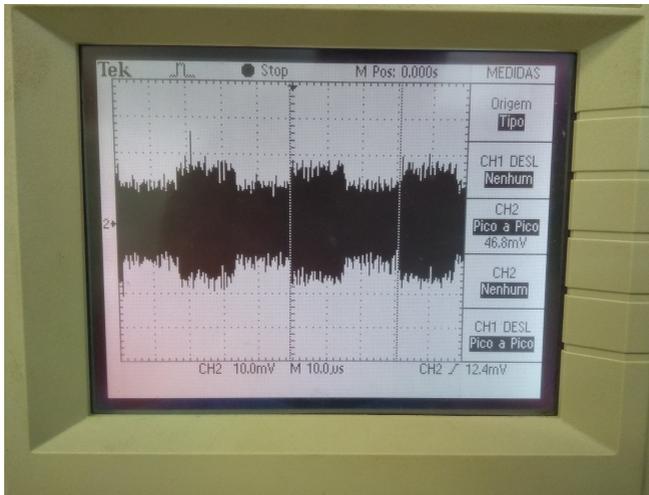
Fonte: Própria

Figura 4.9: Medida - Saída do transmissor.



Fonte: Própria

Figura 4.10: Medida - Entrada do receptor.



Fonte: Própria

Na Figura 4.10 é ilustrado que apesar da atenuação do canal e do ruído, o sinal modulado ainda é sentido pelo receptor, o que é a prova de que o corpo funciona como canal. A atenuação do canal para esse frequência e distância foi estudada em [6] e corresponde a aproximadamente 18 dB. Essa medida equivale somente ao canal e só deve ser utilizada como referência. A comparação do sinal medido na saída do transmissor (460 mV_{pp}) com o sinal aferido na entrada do receptor (50 mV_{pp}) mostra uma atenuação de aproximadamente 19 dB.

Na Figura 4.11 é mostrado o sinal depois de filtrado e amplificado, antes de ser injetado no demodulador. O sinal não precisou ser muito amplificado porque a sensibilidade do misturador é alta (-115 dBm , tabela 3.3). O sinal na entrada do misturador deve ser de baixa amplitude para evitar o

Figura 4.11: Medida - Entrada do demodulador.



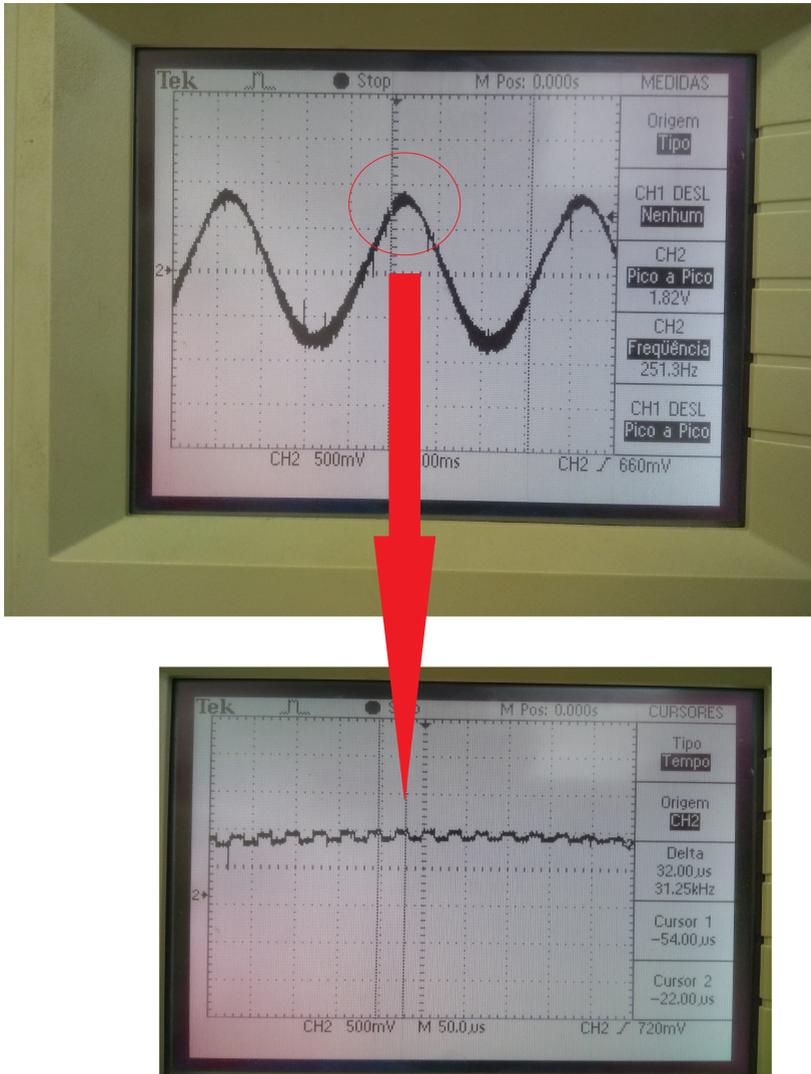
Fonte: Própria

aparecimento de harmônicas de amplitude elevada [7].

Na Figura 4.12 é mostrada a saída do demodulador. observa-se uma sinal de frequência 200 Hz aproximadamente modulando a informação(30 kHz). Esse sinal é a diferença entre as frequências dos osciladores locais de transmissor e receptor. A Figura 4.13 contem o sinal após o filtro passa-baixas de 4º ordem utilizado. O sinal tem amplitude $15.6 mV_{pp}$ e frequência de 30.3 KHz.

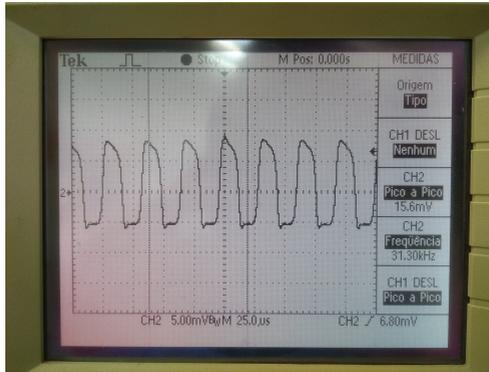
Na Figura 4.14 são ilustrados os sinais de entrada e saída do projeto. O sinal de entrada tem amplitude $106 mV_{pp}$ e o sinal de saída, $8.2 mV_{pp}$. A diferença na amplitude do sinal de saída quando medido ao mesmo tempo que o sinal de entrada se deve ao fato de que as referências do osciloscópio serem as mesmas. Essa ligação faz com que parte do sinal que chega no receptor seja acoplado pela rede elétrica.

Figura 4.12: Medida - Saída do demodulador



Fonte: Própria

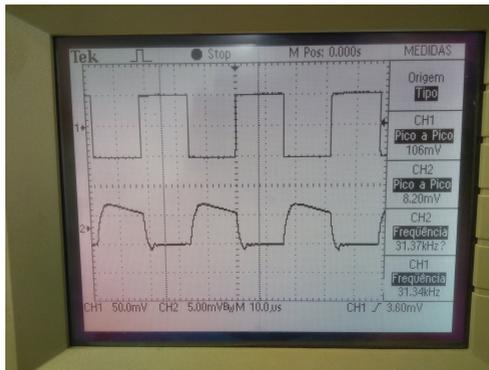
Figura 4.13: Medida - Sinal de saída.



Fonte: Própria

Essa é a razão para qual o HBC capacitivo precisa das duas referências separadas.

Figura 4.14: Comparação Sinal de entrada e Saída.



Fonte: Própria

CAPÍTULO 5

Discussão dos Resultados

5.1 Discussão

O projeto como um todo funcionou muito perto daquilo que era esperado pelas simulações, mas especial atenção deve ser dada a dois problemas:

- Pull-down nos cristais dos osciladores
- O sinal de 200 Hz modulando a saída do misturador do receptor.

Com relação aos cristais, ao montá-los na configuração Colpitts descrita em [7] observou-se que eles não oscilavam com a amplitude mínima requerida pelo *sa602a* (225 mV_{pp} , [7]). Isso acarretou problemas na modulação e demodulação

do sinal. A solução foi colocar um resistor de $5,4 \text{ k}\Omega$ em pull-down nos capacitores de 47 pF dos osciladores do transmissor e receptor. Esse resistor altera a corrente de polarização do oscilador e permite que o mesmo oscile melhor sem perturbar a mesma [7]. Isso fez subir a amplitude do sinal dos cristais e melhorou a resposta do circuito.

Para resolver o problema do sinal de 200 Hz na saída a solução mais elegante é o uso de um PLL. Este recebe ambos os sinais e ajusta suas fases para eliminar a componente que se refere a diferença nas frequências dos osciladores locais. Outro método é o uso de filtros. Pode-se filtrar o sinal de 200 Hz para fora da resposta. O problema com essa solução é que o sinal de 200 Hz , por não passar pelos batimentos inerentes ao translado na frequência, chega na saída com um amplitude muito alta na saída. Tal amplitude cria a necessidade de um filtro de alta ordem para que seja suficientemente reduzida. Esse método foi utilizado e um filtro de quarta ordem precisou ser utilizado.

5.2 Futuras melhorias

O intuito do projeto era ilustrar a capacidade do HBC de funcionar como meio de comunicação. Dito isso, o projeto foi focado em uma aplicação simplista, que não demandava um circuito muito especializado. Serão sugeridas agora algumas modificações que podem ser feitas para deixar o circuito mais robusto e aplicável.

- A frequência escolhida para transmissão através do corpo foi de 20 MHz , em razão do fácil acesso ao cristal. Mas [6] mostra que, apesar de 20 MHz estar na faixa de ope-

ração do HBC, a melhor frequência para transmissão pelo corpo é em torno de 70 MHz.

- Utilizar um PLL para casar as frequências de osciladores locais eliminaria a necessidade do filtro de quarta ordem na saída do demodulador.
- Pode-se ajustar as impedâncias dos módulos do circuito para evitar perda por reflexão.
- Estudar as impedâncias de acoplamento do circuito com o canal e ajustar as mesmas para evitar reflexão no sinal, tanto no transmissor como no receptor.

CAPÍTULO 6

Considerações Finais

6.1 Conclusão

Ao final do trabalho provou-se que o HBC pode ser utilizado como meio de comunicação. O sinal de 30 kHz injetado no transmissor foi capturado no receptor sem o uso de nenhum outro meio de comunicação senão o corpo humano. A informação não foi modulada como era o intuito inicial, mas a transmissão de um sinal com frequência de 30 KHz através do corpo já validou o objetivo principal do trabalho.

6.2 Trabalhos futuros

No futuro o aluno pensa em implementar o que foi provado neste trabalho. Criar uma aplicação que utilize o HBC é uma opção. O foco passará a ser na aplicação e não no projeto

do circuito. Para isso, é necessário fazer com que o arduino transmita um bit em cada frequência, implementando uma FSK completa na modulação da informação, por exemplo.

Melhorias nas topologias dos blocos do circuito, tanto do transmissor como do receptor também são consideradas em trabalhos futuros.

Um outro trabalho possível é uma comparação direta com outros métodos de comunicação, como o Bluetooth e o Zig-Bee, para atestar a usabilidade do HBC como padrão de comunicação.

Referências bibliográficas

- [1] Administrator, “microwave rf information for engineers encyclopedia calculators tools.” [Online]. Available: <https://www.microwaves101.com/encyclopedias/cascade-analysis>

- [2] K. Fujii, K. Ito, and S. Tajima, “A study on the receiving signal level in relation with the location of electrodes for wearable devices using human body as a transmission channel,” in *Antennas and Propagation Society International Symposium, 2003. IEEE*, vol. 3. IEEE, 2003, pp. 1071–1074.

- [3] J. Hwang, T. Kang, and S. Kang, “Measurement results of human body’s signal loss with multiple subjects for human body communication,” in *Antennas and Propagation (APSURSI), 2011 IEEE International Symposium on*. IEEE, 2011, pp. 1666–1669.

- [4] J.-S. Lee, Y.-W. Su, and C.-C. Shen, “A comparative study of wireless protocols: Bluetooth, uwb, zigbee, and wi-fi,” in *Industrial Electronics Society, 2007. IECON 2007. 33rd Annual Conference of the IEEE*. Ieee, 2007, pp. 46–51.
- [5] M. Li, Y. Song, G. Wang, Q. Hao, and K. Zang, “Characterization of the implantable intra-body communication based on capacitive coupling by transfer function,” in *Sensing Technology (ICST), 2016 10th International Conference on*. IEEE, 2016, pp. 1–5.
- [6] M. D. Pereira, K. T. Silvestri, and F. R. de Sousa, “Measurement results and analysis on a hbc channel,” in *Medical Measurements and Applications (MeMeA), 2014 IEEE International Symposium on*. IEEE, 2014, pp. 1–6.
- [7] P. Semiconductors, “Reviewing key areas when designing with the sa605.”
- [8] N. Seyed Mazloun, “Body-coupled communications-experimental characterization, channel modeling and physical layer design,” 2008.
- [9] T. G. Zimmerman, “Personal area networks: near-field intrabody communication,” *IBM systems Journal*, vol. 35, no. 3.4, pp. 609–617, 1996.

CAPÍTULO 7

Anexo

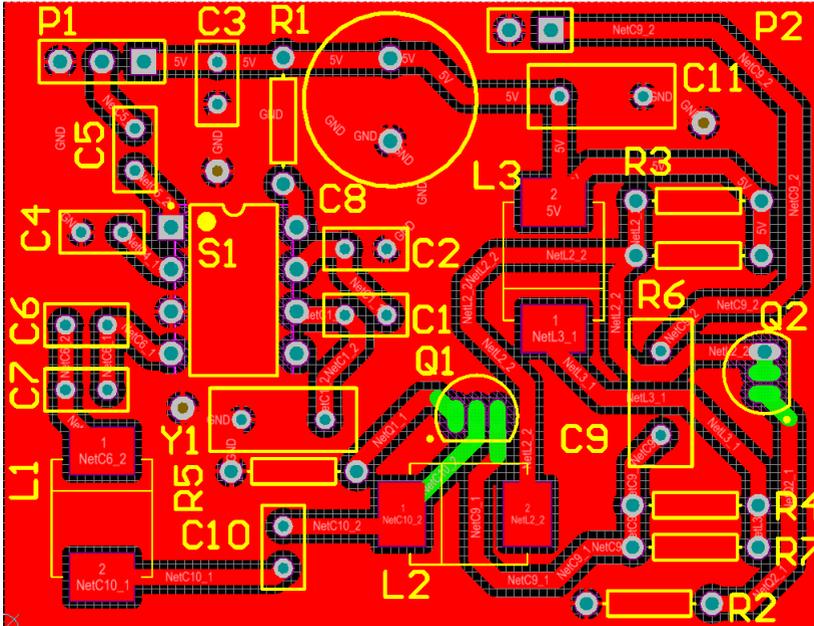


Figura 7.1: Projeto do protótipo 2 - TX

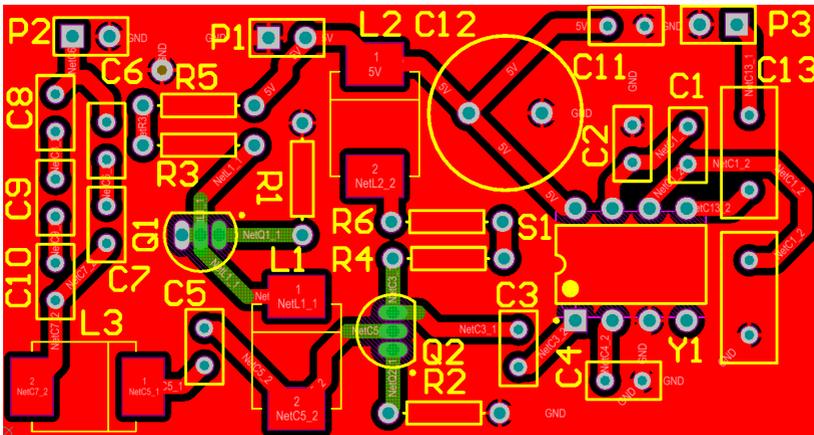


Figura 7.2: Projeto do protótipo 2 - RX