

# Projeto de um Transmissor OOK Ultrassônico para Aplicações de IoT

Giovana Pegoraro Ceolin, Henrique Finatto, Lucas Compassi Severo

Universidade Federal do Pampa – Campus Alegrete

Alegrete, RS, Brasil

giovana\_ceolin@hotmail.com, henrique.finatto@alunos.unipampa.edu.br, lucassevero@unipampa.edu.br

**Resumo**—O presente trabalho apresenta uma proposta de transmissor do tipo On-Off Keying (OOK), utilizando sinais de ultrassom e transdutor piezoelétrico. O transdutor piezoelétrico é caracterizado para a obtenção da impedância de entrada, carga do circuito transmissor. Com base nisso o circuito transmissor é projetado para operar na frequência de 40kHz. O circuito foi simulado, prototipado em matriz de contatos e uma placa de circuito impresso foi desenvolvida. Os resultados experimentais mostram que o circuito atendeu aos requisitos desejados e pode ser empregado na comunicação de dispositivos de internet das coisas (IoT).

**Palavras-chave**— Internet das Coisas, Comunicação sem Fio, Ultrassom.

## I. INTRODUÇÃO

A internet das coisas (IoT, do inglês Internet of Things) é um dos tópicos de pesquisa da área de eletrônica com maior enfoque atual. A IoT abrange uma grande faixa de aplicações, indo desde áreas como agricultura de precisão até biomédica. A característica fundamental destes dispositivos é a comunicação direta com a rede de internet para possibilitar a troca de dados com a nuvem. Esta comunicação, em sua maioria, é realizada sem fio através de ondas eletromagnéticas, utilizando padrões de comunicação de baixa potência. Entre eles destacam-se o padrão Bluetooth Low Energy (BLE) para comunicação de curto alcance e o padrão LoRa para longo alcance. Tais padrões utilizam as bandas ISM (Industrial Scientific and Medical) de 433 MHz, 900 MHz e 2.4 GHz para a comunicação. Devido ao grande número de dispositivos de IoT conectados e previsão de grande aumento, tais bandas tendem a ficar congestionadas no futuro devido à grande quantidade de tráfego [1].

Para evitar o congestionamento dos canais na faixa de radiofrequência, outros meios de comunicações podem ser estudados e empregados para IoT. Entre as possibilidades encontra-se a comunicação por onda sonora na faixa de ultrassom, superior à 20 kHz [1, 2]. Nesta faixa é possível transmitir sinais de banda estreita em curtas distâncias. A grande vantagem desta técnica se dá pela simplicidade de projeto e implementação dos circuitos em baixa frequência. Além disso, os circuitos tendem a dissipar menores quantidades de potência em relação aos circuitos de RF, colaborando para a construção de dispositivos de IoT com baixo consumo.

Na comunicação por ultrassom, transdutores são utilizados para converter os sinais elétricos em ondas sonoras. Dentre os diversos tipos de transdutores os do tipo piezoelétrico são os mais utilizados em diversas aplicações devido ao seu baixo custo, pequena dimensão e peso reduzido [3, 4, 5].

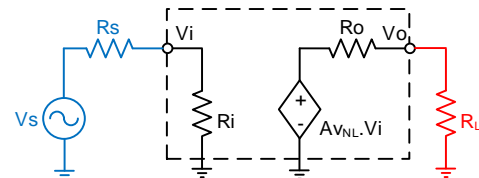


Fig. 1- Modelo elétrico do sistema de transmissão-recepção de sinais via ultrassom.

Os dispositivos de comunicação por ultrassom, utilizando transdutores piezoelétricos são encontrados em diversas aplicações, como por exemplo na identificação de objetos para auxiliar a locomoção de deficientes visuais [6] e circuitos implantáveis no corpo humano para o monitoramento de sinais vitais [2].

Neste contexto, este trabalho apresenta o projeto de um transmissor OOK (On-Off Keying) para a transmissão de sinais digitais via ultrassom que pode ser utilizado por dispositivos de IoT. Para a transmissão dos sinais um transdutor piezoelétrico na faixa de 40kHz é utilizado. Para o desenvolvimento deste projeto foi realizada a caracterização elétrica do transdutor para obter a sua impedância AC de entrada que será a carga do circuito transmissor. O transmissor foi projetado, simulado e um protótipo foi fabricado e medido em laboratório.

Este trabalho está organizado da seguinte forma, a Seção II demonstra a metodologia utilizada para a caracterização da impedância de entrada, a Seção III apresenta a descrição detalhada do circuito proposto e as etapas do projeto, a Seção IV apresenta os resultados experimentais obtidos e, finalmente, a Seção V apresenta a conclusão do trabalho.

## II. CARACTERIZAÇÃO ELÉTRICA DO TRANSDUTOR PIEZOELÉTRICO

Inúmeras estratégias disponíveis na literatura foram propostas para a caracterização elétrica de transdutores piezoelétricos baseando-se na modelagem física da conversão eletro-acústica e do meio onde o sinal é transmitido [7, 8]. Porém, este tipo de modelagem apresenta uma série de simplificações e não levam em conta os parâmetros de diretividade e as relações entre a transmissão e recepção dos sinais.

Neste trabalho, a modelagem do sistema transmissor-receptor foi realizada com base no modelo de quadripolo, comumente utilizado na análise de amplificadores [9], conforme ilustra a Fig. 1. Este método permite a caracterização da impedância de entrada do transdutor utilizado na transmissão ( $R_i$ ), da impedância de saída do transdutor utilizado na recepção ( $R_o$ ) e a atenuação do meio de comunicação com base no parâmetro de ganho de tensão

( $A_{V_{NL}}$ ). Além disso, esta abordagem considera os efeitos das impedâncias da fonte ( $R_s$ ) e carga ( $R_L$ ). Neste modelo, o ganho de tensão do circuito pode ser estimado com base na Eq. 1.

$$\frac{V_o}{V_i} = A_v = A_{v_{NL}} \cdot \left( \frac{R_i}{R_s + R_i} \right) \cdot \left( \frac{R_L}{R_o + R_L} \right) \quad (1)$$

$$R_i = \frac{A_{v_2} \cdot R_{s_2} - A_{v_1} \cdot R_{s_1}}{A_{v_1} - A_{v_2}} \quad (2)$$

Para este trabalho, apenas a informação de  $R_i$  foi obtida com o intuito de servir como base para a modelagem da carga presente na saída do transmissor. Para a medida de  $R_i$  o conjunto transmissor-receptor foi caracterizado utilizando um analisador de redes E5061B com interface de baixa frequência (LF3L5), conforme segue a Fig. 2. Baseando-se na função de transferência e na redução do ganho de tensão com a variação do resistor  $R_s$  é possível estimar  $R_i$  utilizando a Eq. 2. Esta equação é derivada da Eq. 1 e os parâmetros  $A_{v_1}$  e  $A_{v_2}$  são os valores de ganho de tensão obtidos com  $R_s$  iguais a  $R_{s1}$  e  $R_{s2}$ , respectivamente. Nesta caracterização foi obtido o valor de  $490 \Omega$  para a resistência de entrada do transdutor.

### III. PROJETO DO TRANSMISSOR OOK

A Fig. 3 apresenta o diagrama de blocos do transmissor de ultrassom proposto neste trabalho. O sinal de ultrassom é gerado com base em um oscilador senoidal configurado para a frequência de interesse, neste caso igual a 40 kHz. A modulação OOK é obtida com um circuito de chaveamento de forma que o oscilador seja ligado e desligado através do sinal presente na Entrada Digital. Após o oscilador, um Buffer de tensão é utilizado para isolar o oscilador do restante do circuito. Na saída, um filtro passivo é utilizado para filtrar os sinais fora de banda gerados pelas não-linearidades dos circuitos oscilador e buffer de tensão. Por fim, o sinal de saída é entregue ao transdutor piezoelétrico.

O esquemático do circuito proposto é mostrado na Fig. 4. Para facilitar o detalhamento do uso de tais circuitos, cada bloco será contextualizado, juntamente com a sua funcionalidade, nas seguintes subseções.

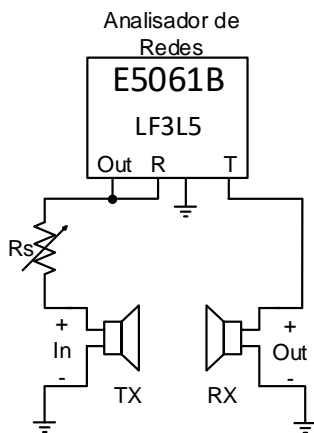


Fig. 2 - Caracterização AC do transdutor Piezoelétrico.

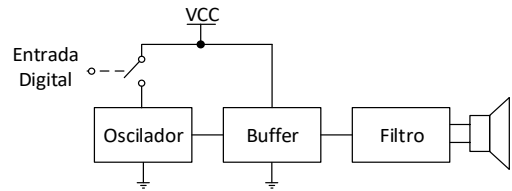


Fig. 3: Circuito Transmissor (TX) OOK proposto.

#### A. Circuito de Chaveamento

O circuito de chaveamento foi empregado para a modulação digital do sinal com o padrão OOK (On-Off Keying). Este circuito é baseado em um transistor bipolar de junção (TBJ) operando no modo corte-condução e funcionando como um “interruptor” para ligar e desligar o oscilador em períodos de tempo determinados pelo sinal digital de entrada. Foi determinada a sua topologia devido à simplicidade de implementação e atendimento à necessidade de modulação do sinal do oscilador.

O sistema de chaveamento foi implementado com um TBJ BC327-25 do tipo PNP. O sinal digital de entrada, representado no esquemático por “OOK”, é acoplado à base deste transistor através do resistor “ $R_{chave}$ ” que fornece uma alta impedância para o circuito digital de comunicação. Quando o sinal OOK é igual à VCC, o transistor opera em corte e a tensão  $V_s$  torna-se próxima a zero, desligando o circuito oscilador. Com o sinal OOK igual a zero, o transistor conduz e fornece uma tensão próxima a VCC para o circuito oscilador, permitindo o início da oscilação.

Adicionalmente, o resistor  $R_5$  foi empregado no circuito para operar como um caminho de descarga para os capacitores do circuito oscilador e garantir o desligamento do oscilador quando o transistor está em corte.

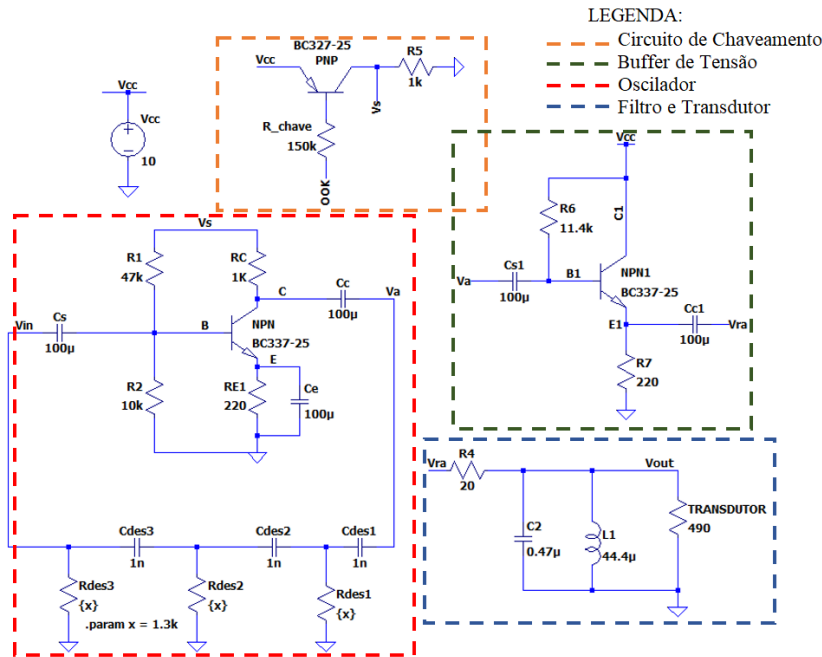
#### B. Circuito Oscilador

Este circuito é o principal elemento do transmissor, pois fornece o sinal senoidal na faixa de ultrassom que será transmitido pelo transdutor piezoelétrico.

O oscilador foi projetado utilizando uma topologia de realimentação por deslocamento de fase, visando a estabilidade que a topologia de realimentação fornece e a sua simplicidade de implementação [9]. Nesta topologia o amplificador de tensão é realimentado por uma rede que desloca a fase em  $180^\circ$  na frequência de oscilação desejada. O amplificador presente no oscilador é do tipo emissor-comum com desvio no emissor e polarização por divisor de tensão [9] e foi implementado com um transistor TBJ BC337-27 do tipo NPN, complementar ao utilizado no circuito de chaveamento. Este amplificador foi projetado para que o ganho de tensão seja superior a 29 V/V e o critério de Nyquist seja satisfeito para gerar a instabilidade necessária para a oscilação.

A rede de realimentação foi projetada para que a frequência de operação do oscilador seja igual a 40 kHz. Com base nesta frequência, os resistores “ $R_{des1}$ ”, “ $R_{des2}$ ” e “ $R_{des3}$ ” e os capacitores “ $C_{des1}$ ”, “ $C_{des2}$ ” e “ $C_{des3}$ ” foram dimensionados com base na Eq. 3. Neste caso, valores iguais a R e C foram adotados para todos os capacitores e resistores, respectivamente.

$$f_{osc} = \frac{1}{2\pi \cdot R \cdot C \cdot \sqrt{6 + 4 \cdot \left( \frac{RC}{R} \right)}} \quad (3)$$



**Fig. 4** – Esquemático do circuito transmissor OOK proposto. Resistências Rdes1, Rdes2 e Rdes3 possuem o valor de 1.3 kΩ.

### C. Buffer de Tensão

O circuito buffer tem a funcionalidade de alterar a impedância vista na saída do oscilador de modo que o mesmo não seja afetado pelas variações de impedância na carga. Neste projeto o buffer foi implementado com um amplificador seguidor de emissor [9] utilizando o TBJ BC337-25 do tipo NPN. Este amplificador fornece uma impedância de aproximadamente 10 kΩ para o oscilador, ao mesmo tempo, que apresenta uma baixa impedância de saída. Esta característica é importante para que o nível de tensão gerado pelo oscilador seja mantido no transdutor.

### D. Filtro de Saída

Os circuitos oscilador e buffer de tensão apresentam características não lineares que fazem com que o sinal de saída não seja puramente senoidal. Esta impureza gera sinais harmônicos em sua saída que podem perturbar canais de comunicação adjacentes à frequência de interesse. Para reduzir este efeito, um filtro passivo do tipo passa-faixa foi adicionado à saída do buffer de tensão.

A implementação deste circuito foi desenvolvida de modo que a frequência central seja igual a 40 kHz e largura de banda condizente com a aplicação.

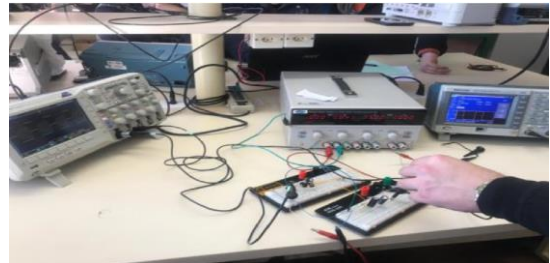
## IV. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

O circuito proposto foi projetado com base na modelagem de pequenos sinais e foi ajustado com base na simulação elétrica utilizando o simulador LTspice. Baseando-se nestas simulações, os valores dos componentes calculados foram ajudados para os valores presentes comercialmente. Todos os valores dos componentes utilizados estão mostrados no esquemático da Fig. 4.

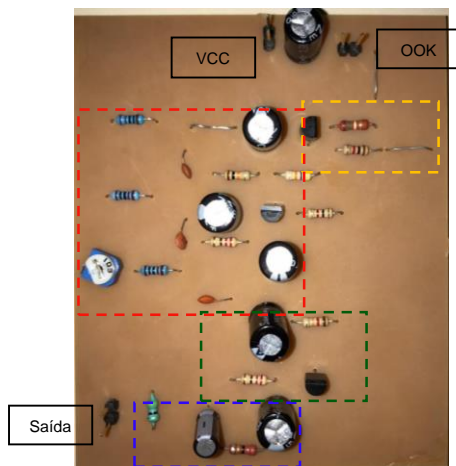
Após a determinação de um diagrama de blocos genérico (demonstrado pelas linhas tracejadas da Fig. 4), o projeto

matemático dos circuitos foram determinados. Obteve-se o resultado esperado dos mesmos nas simulações e deram início as etapas de montagem do protótipo. Para isso, foi utilizada a infraestrutura disponível no Laboratório de Eletrotécnica da Unipampa Campus Alegrete.

Primeiramente, o circuito foi implementado utilizando uma matriz de contatos para a verificação da operação e a comparação dos resultados medidos com os da simulação elétrica, conforme ilustra a Fig. 5.



**Fig. 5** – Circuito montado em uma matriz de contatos para os testes iniciais.



**Fig. 6** - Placa de circuito impresso fabricada para a prototipação do circuito.

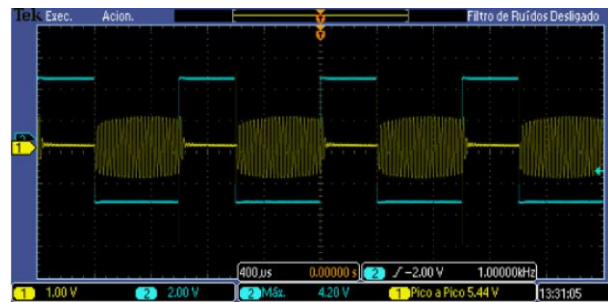
Na sequência, foi desenvolvida uma placa de circuito impresso para a prototipação do circuito proposto. Para isso, o software Autodesk Eagle foi utilizado para a elaboração do layout e uma fresadora LPKF foi utilizada para a confecção da placa em fenolite. A Fig. 6 apresenta uma imagem da PCI fabricada após a soldagem dos componentes.

O circuito foi caracterizado utilizando um osciloscópio Tektronix DPO2024 para análise do sinal de saída e um gerador de forma de onda Keysight E3630 para geração do sinal digital de entrada. Além disso, uma fonte de tensão CC de bancada foi utilizada para energizar o circuito com 10 V.

A Fig. 7 mostra o resultado de medida para o sinal de saída do transmissor OOK proposto quando um sinal digital de 1 kHz é aplicado na entrada digital. Como pode-se perceber, quando o sinal digital está em nível alto, o oscilador não opera, uma vez que o transistor PNP utilizado está em modo aberto. Porém, quando o sinal digital assume nível lógico baixo, a tensão VCC é entregue ao oscilador e o mesmo entra em operação, gerando um sinal senoidal com frequência de 40 kHz. Deste modo, no transmissor OOK proposto o sinal lógico “0” é transmitido pelo sinal senoidal (modo - ON), enquanto que o sinal lógico “1” é transmitido pela ausência de sinal (modo - OFF).

No circuito prototipado um resistor variável foi adicionado à rede de realimentação para permitir o ajuste da frequência do oscilador. Neste ajuste, foi verificado que o presente circuito é capaz operar em uma faixa de 30 a 50kHz, o que permite a utilização do mesmo em diversos canais de comunicação por divisão de frequência, como utilizado nos circuitos de IoT.

O circuito completo apresentou potência CC medida igual a 320 mW, que condiz com a técnica discreta de implementação e a tensão de alimentação de 10V empregada.



**Fig. 7** – Sinais medidos no protótipo do transmissor OOK proposto. Sinal de saída do transmissor (CH1- Amarelo, em 40kHz) e sinal digital de entrada (CH2 – Azul, em 1kHz).

## V. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou a proposta de um circuito transmissor OOK baseado em ultrassom para utilização nos circuitos de comunicação de IoT. A transmissão do sinal foi executada utilizando um transdutor piezoelétrico cuja impedância de entrada foi caracterizada.

O circuito foi projetado, simulado e prototipado em laboratório. Os resultados medidos são condizentes com os resultados simulados e o transmissor operou adequadamente na frequência de 40kHz, apresentando consumo de potência de 320 mW quando alimentado com 10 V.

Como trabalhos futuros, espera-se desenvolver um circuito receptor com circuito de demodulação para que o protótipo possa ser testado e verificado em uma aplicação real. Além disso, espera-se utilizar a técnica de caracterização do transdutor piezoelétrico com base no modelo apresentado para que a atenuação do espaço de comunicação possa ser modelada.

## REFERÊNCIAS

- [1] E. Novak, Z. Tang and Q. Li, "Ultrasound Proximity Networking on Smart Mobile Devices for IoT Applications," in IEEE Internet of Things Journal, vol. 6, no. 1, pp. 399-409, Feb. 2019.
- [2] A. S. Rekhi and A. Arbabian, "Ultrasonic Wake-Up with Precharged Transducers," IEEE J. Solid-State Circuits (JSSC), vol. 54, no. 5, pp. 1475-1486, 2019.
- [3] S. Franco, Projeto de Circuitos Analógicos: discretos e integrados. Porto Alegre: AMGH, 2016.
- [4] J. P. C. Matheus et al. Efeitos do ultra-som terapêutico nas propriedades mecânicas do músculo esquelético após a contusão, Rev. Bras. Fisioterapia, v. 12, n. 3, 2008, p. 241-247.
- [5] T. Ohnishi et al. Image feature conversion of pathological image for registration with ultrasonic image, International Workshop on Advanced Image Technology 2018.
- [6] S. Ram e J. Shart. The people sensor: a mobility aid for the visually impaired, Second International Symposium on Wearable Computers, 1998.
- [7] L. F. Brown and D. L. Carlson, "Ultrasound transducer models for piezoelectric polymer films," in IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, vol. 36, no. 3, pp. 313-318, May 1989.
- [8] V. T. Rathod, A Review of Electric Impedance Matching Techniques for Piezoelectric Sensors, Actuators and Transducers, Electronics, v. 8, n. 2 169, 2019.
- [9] R. L. Boylestad, L. Nashelsky, Dispositivos eletrônicos e teoria de circuitos. 8. ed. Prentice Hall, 2004.