

## OXÍMETRO DE PULSO MICROCONTROLADO COM INTERFACE GRÁFICA VIA RASPBERRY PI E TRANSMISSÃO SEM FIO ATRAVÉS DO PROTOCOLO ZIGBEE

*Janito dos Santos Ramos – janitodossantos23@gmail.com*

*Maico da Silva Lima – maicolima2010@hotmail.com*

*Deilton Gonçalves Gomes – deilton@cefetmg.br*

*Rafael José Fonseca de Sá – rafaeljfsa@cefetmg.br*

*Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – Campus III, Faculdade de  
Engenharia de Controle e Automação  
R. José Péres, 558 - Centro  
36.700-000 – Leopoldina – Minas Gerais*

**Resumo:** *O desenvolvimento de um dispositivo não invasivo possibilita a aplicação de vários conceitos transmitidos durante o curso da engenharia, principalmente eletrônica: instrumentação eletrônica, projeto de circuitos, processamento de sinais e programação. Assim, o desenvolvimento desses equipamentos apresenta níveis de complexidade e relevância para um projeto em engenharia. Neste contexto, este trabalho descreve o desenvolvimento de um sistema de hardware e software de um oxímetro de pulso que permite o monitoramento local e remoto de saturação de oxigênio no sangue e frequência cardíaca de um paciente. O sistema foi projetado e implementado em um microcontrolador. Um display LCD conectado diretamente em um Raspberry PI é utilizado para o monitoramento local do paciente e usando o protocolo ZigBee, dados são enviados através de uma rede sem fio para um computador. A eficiência dos dados transmitidos foi monitorada e verificada. Finalmente, análise e comparação de medidas de saturação de oxigênio no sangue e frequência cardíaca obtidas simultaneamente a partir do uso do sistema desenvolvido e um oxímetro comercial são apresentadas.*

**Palavras-chave:** *Oxímetro de pulso, Saturação de oxigênio, Frequência cardíaca, Microcontroladores, ZigBee, Monitoramento remoto*

### 1 INTRODUÇÃO

O processo de ensino e pesquisa passa por um período de intensa reformulação devido a necessidade de acompanhar as rápidas transformações provenientes da internet e informática, dos dispositivos eletrônicos etc. As metodologias buscam essencialmente a construção do conhecimento a partir da experiência, que aproxima os estudantes da realidade, tornando-os mais aptos para seu papel na sociedade.

Atualmente o desenvolvimento tecnológico está permitindo diagnósticos cada vez mais precisos e com maior rapidez, proporcionando ao paciente, segurança e bem-estar com exames menos invasivos.

O desenvolvimento de equipamento não invasivo através de uso de novas tecnologias tem permitido a melhoria do acesso, a eficiência, a efetividade e a qualidade dos processos clínicos e assistenciais necessários a toda a cadeia de prestação de serviços de saúde.

Os sinais biomédicos óticos têm sido muito estudados e o número de publicação e revisão bibliográfica abordando o tema tem crescido (BRONZINO, 2015). Oferecem a possibilidade

de desenvolver equipamentos pequenos, práticos que permitem diagnósticos não invasivo, de baixo custo e resposta rápida e eficiente (MARTINS, 2010; MUKHOPADHYAY, 2012).

A obtenção de sinais vitais de pacientes hospitalares através de processos não invasivos vem sendo utilizada com frequência através de análise e aplicação de técnicas e princípios óticos importantes como a fotopletismografia, a espectrofotometria e a lei de Beer-Lambert.

A taxa de saturação de oxigênio no sangue ( $SaO_2$ ) é o quinto sinal vital mais utilizado em procedimentos médicos, juntamente com a frequência cardíaca ( $FC_{inst}$ ).

Neste contexto, o trabalho apresenta o desenvolvimento de um sistema integrado de *hardware* e *software* de um oxímetro de pulso para a obtenção de curvas pletismográficas, e medição de  $SaO_2$  e  $FC_{inst}$  de um indivíduo. Este trabalho propõe um sistema de monitoramento em tempo real, a fim da obtenção dos dados e transmissão destes via sem fio por meio de uma rede de comunicação ZigBee. Também o sistema trabalha com dados recebidos local via serial, através da visualização das medidas em uma interface gráfica no Raspberry Pi.

Com o sistema desenvolvido foram realizados testes com seis indivíduos, onde foram coletadas a curva pletismográfica e os valores de  $SaO_2$  e da  $FC_{inst}$ , a fim da comparação de resultados com um oxímetro comercial.

## 2 OXÍMETRO DE PULSO

Um oxímetro de pulso é um dispositivo não invasivo que mede a  $FC_{inst}$  e a porcentagem de oxiemoglobina ( $HbO_2$ ) do sangue arterial (conhecida como  $SaO_2$ ).

Esse equipamento realiza medidas da  $SaO_2$  pela transmissão de dois comprimentos de onda de um sinal luminoso, normalmente 660 nm (vermelho) e 940 nm (infravermelho), e detecção destes com o fotodiodo (YADAV and AYUB, 2014).

A absorção destes comprimentos de ondas emitidos pelos dois sinais luminosos difere significativamente, entre a hemoglobina oxigenada ( $HbO_2$ ) e a desoxigenada ( $Hb$ ), sendo possível determinar as concentrações de  $HbO_2$  e  $Hb$  ( $C_{HbO_2}$  e  $C_{Hb}$ ) a partir dessa diferença, como pode ser observado na Figura 1 (KUMAR, 2012; CHAN, 2013).

A partir da lei de Beer-Lambert tem-se que  $SaO_2$  (em %) é dada pela expressão:

$$SaO_2 = \frac{HbO_2}{HbO_2 + Hb} = \frac{C_{HbO_2}}{C_{HbO_2} + C_{Hb}} \quad (1)$$

A equação 1 fornece valores de  $SaO_2$  incorretos, por não levar em consideração a dispersão nos glóbulos vermelhos.

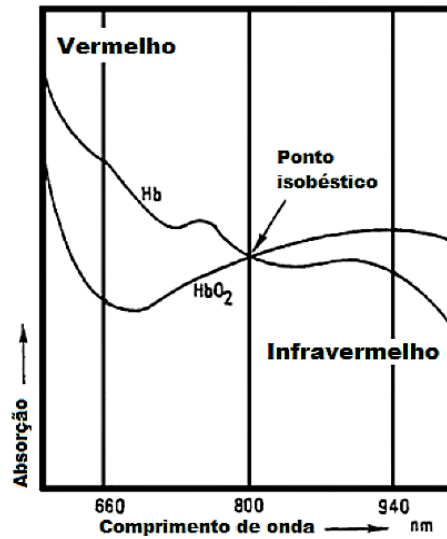
A Figura 2 mostra duas curvas, uma usando a lei Beer-Lambert e outra baseada em dados empíricos (obtidos invasivamente de voluntários saudáveis), relacionando a razão  $R$  e a  $SaO_2$  do paciente (NEIL, 2018).

A  $SaO_2$  da curva empírica da Figura 2 é dada em função da razão  $R$  (BRONZINO, 2015):

$$SaO_2 = \frac{a - b * R}{c - d * R} * 100\% \quad (2)$$

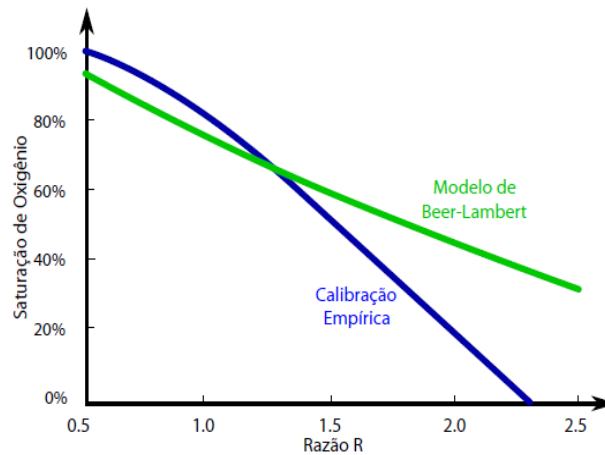
Onde, a = 1000, b = 550, c = 900 e d = 350.

Figura 1 – Absorção de luz para HbO<sub>2</sub> e Hb.



Fonte: Adaptado: (Kumar, 2012; Chan, 2013).

Figura 2 – Comparação entre lei de Beer-Lambert e calibração empírica.



Fonte: Adaptado: (NEIL, 2018).

A razão  $R$  é obtida pela curva pletismográfica usando método dos picos e vales (valores máximos e mínimos dos sinais vermelho “V” e infravermelho “IV”). Assim, de acordo com Webster (WEBSTER, 1997), a razão  $R$  é dado por:

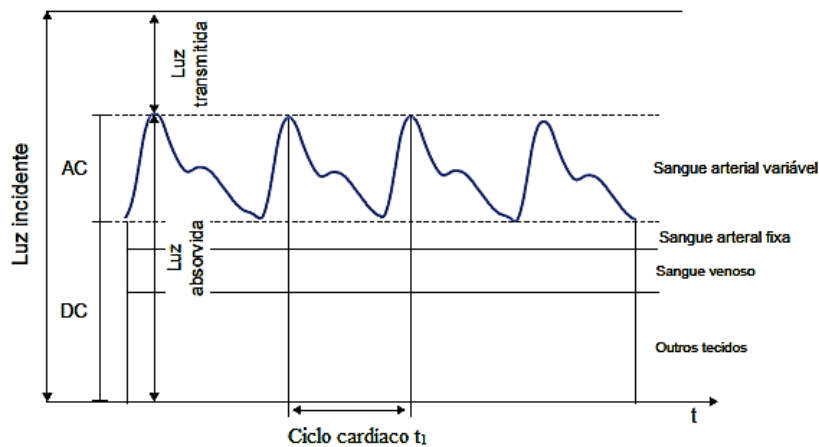
$$R = \frac{\ln\left(\frac{V_{MIN}}{V_{MAX}}\right)}{\ln\left(\frac{IV_{MIN}}{IV_{MAX}}\right)} \quad (3)$$

A  $FC_{inst}$  é um aspecto fisiológico importante para se medir em diversas aplicações médicas, e pode ser estimada baseando no princípio de fotopletismografia (MARTINS, 2010).

A curva pletismográfica com o ciclo cardíaco é mostrada na Figura 3.



Figura 3 – Curva pletismográfica da luz transmitida.



Fonte: (MARTINS, 2010).

Através do sinal AC da luz pode estimar-se a  $FC_{inst}$ . A  $FC_{inst}$  é expressa em batimento por minutos (BPM) e pode ser calculada a partir do intervalo entre batidas ( $t_1$ ), através da equação:

$$FC_{inst} = \frac{60}{t_1} \quad (4)$$

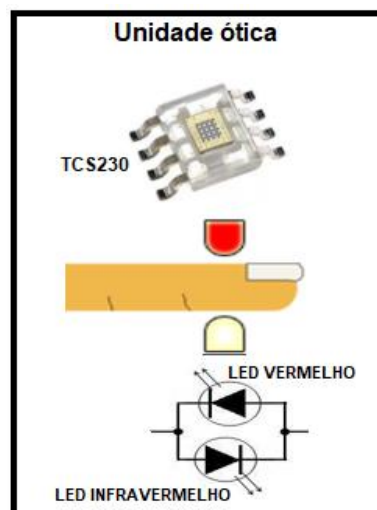
### 3 HARDWARE DO OXÍMETRO DE PULSO

#### 3.1 Unidade ótica

Para realizar a medição de sinais biomédicos foi desenvolvido um protótipo dotado de uma pequena placa de circuito impresso responsável pela acomodação dos LEDs ligados em antiparalelo e do fotosensor (TCS230). A estrutura mecânica deste protótipo é no formato de uma pinça, na qual se aloja um dos dedos da mão. O esquemático simplificado é mostrado na Figura 4.

Devido a diversas fontes de ruídos externos e a importante necessidade de alinhamento do sensor com os LEDs, foi utilizado uma construção mecânica de um modelo comercial.

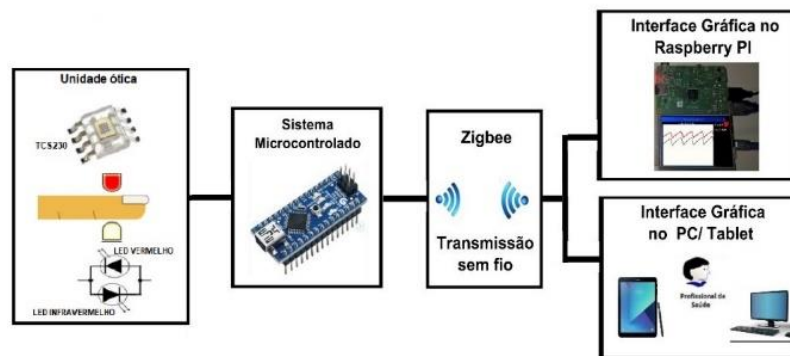
Figura 4 – Unidade ótica do oxímetro de pulso.



### 3.2 Módulo receptor

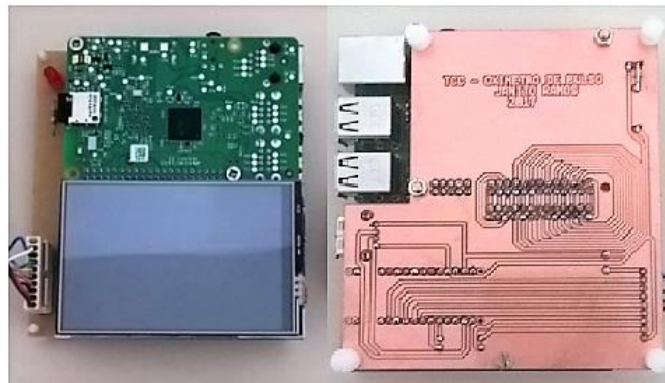
A Figura 5 apresenta o diagrama do oxímetro de pulso no qual o microcontrolador utilizado é o Arduino. A luz emitida pelos LEDs não absorvida pelo tecido, unha e diversos componentes constituintes do sangue no dedo é captada pelo fotosensor. O fotosensor gera na saída uma onda quadrada com frequência proporcional a luz captada. Essa frequência é processada e analisada no sistema microcontrolado e enviada via serial ou via rede sem fio com ZigBee, para a interface gráfica no Raspberry Pi ou no computador, onde serão mostradas as curvas pletismográfica dos sinais dos LEDs, e os valores de  $SaO_2$  e  $FC_{inst}$ .

Figura 5 – Diagrama do projeto implementado.



A placa de circuito impresso (PCI) do oxímetro de pulso usinada e com os componentes soldados é apresentada na Figura 6.

Figura 6 –Placa PCI do oxímetro de pulso.



## 4 SOFTWARE

O software elaborado para o circuito com o microcontrolador Arduino foi desenvolvido em linguagem C/C++ no Arduino IDE.

O programa para a obtenção da curva pletismográfica e os cálculos de  $SaO_2$  e  $FC_{inst}$  pode ser observado na estrutura de repetição expressa no fluxograma da Figura 7.

O programa inicia-se com a declaração de variáveis globais, a definição dos pinos dos LEDs e do TCS230, a configuração da frequência do TCS230 e a definição da taxa de transmissão (*baud rate*) da porta serial na qual serão enviados os dados.

São coletadas 200 amostras de frequência de cada sinal a cada ciclo.

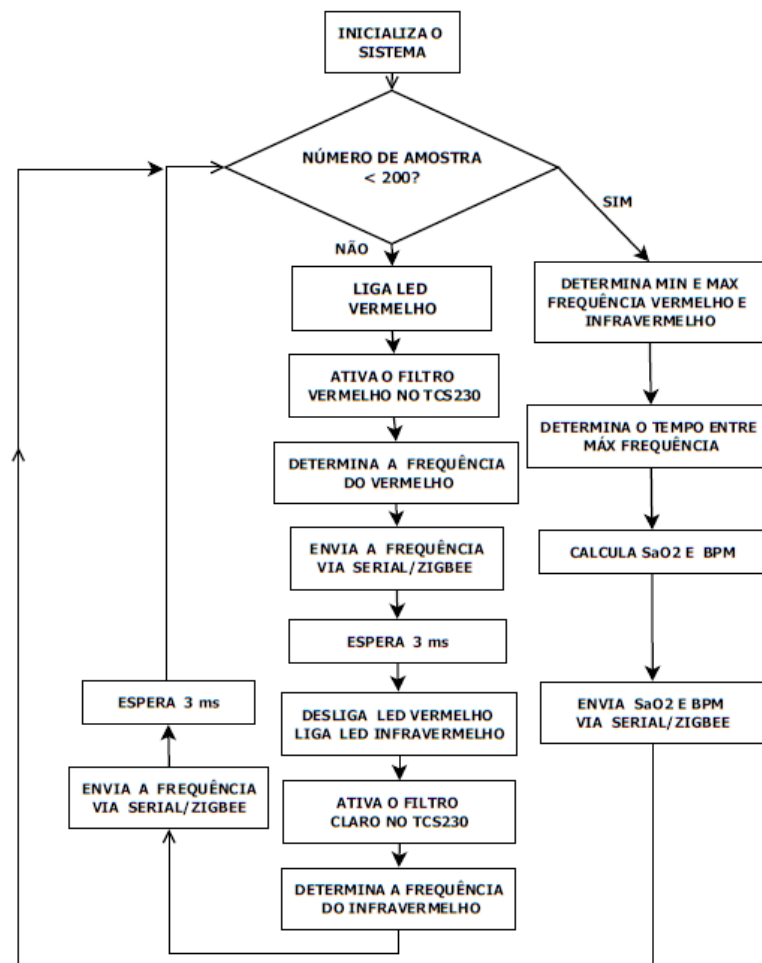
A sistema inicia-se ligando o LED vermelho, posteriormente seleciona o filtro vermelho do TCS230. Seguidamente, mede-se o período da onda quadrada da saída do TCS230, determina a frequência e envia o valor da mesma para o microcontrolador.

Após 3 ms, o mesmo procedimento se repete para o LED infravermelho.

Quando coletadas 200 amostras de cada frequência, através da comparação determina-se os valores máximos e mínimos da frequência do sinal vermelho e infravermelho, conforme o método de pico e vale. Também determina-se o tempo entre dois pontos máximos da amostra.

Os próximos passos são os cálculos de  $SaO_2$  e de  $FC_{inst}$ , conforme o apresentado ao longo deste trabalho. Após os cálculos das variáveis de interesse, é iniciado um novo ciclo.

Figura 7 – Fluxograma do software embarcado no Arduino.



Para facilitar a visualização dos resultados desenvolveu-se uma interface gráfica, utilizando o software *Processing*. A interface gráfica apresenta as curvas pletismográfica do sinal vermelho e infravermelho e as medidas de  $SaO_2$  (em %) e de  $FC_{inst}$  (em BPM).

## 5 REDE DE COMUNICAÇÃO SEM FIO – PROTOCOLO ZIGBEE

Os dispositivos Xbee (módulos onde é implementado o protocolo ZigBee), permitem o estabelecimento de comunicações sem fio de forma bastante simples operando com 868 MHz (Europa), 915 MHz (Estados Unidos) e 2,4 GHz (outras partes do mundo) (KUMAR, 2016).

Neste trabalho, foi utilizado a frequência de 2,4 GHz com 16 canais. As redes ZigBee oferecem uma excelente imunidade contra interferências e pode hospedar milhares (até 65000)



de dispositivos numa rede, com taxas de transferências de dados variando entre 20 *kbps* a 250 *kbps*.

Os módulos apresentam um baixíssimo consumo de energia (por volta de 1 *mW*), sendo possível criar sensores remotos alimentados por baterias comuns (WATTHANAWISUTH et al, 2010).

A rede ZigBee é formada por três tipos de dispositivos, sendo eles: o Coordenador, o Roteador e o Dispositivo Final (“*End Device*”). Todos eles podem gerar sinais de controle ou receber informações do hardware no qual estiverem conectados.

Um dispositivo Xbee pode ser configurado no modo de Operação AT (*Application Transparent*) e API (*Application Programming Interface*), onde no modo AT os dados são enviados de forma transparente e no modo API os dados são enviados em pacotes (*frames*) (KUMAR, 2016).

Usualmente os dispositivos Xbee operam nas topologias malha, árvore ou estrela. A topologia malha merece destaque pela possibilidade de reestruturação da rede, onde pode existir mais de um caminho para a transmissão de dados, e caso haja perda de sinal de algum dispositivo, outros roteadores assumem a transmissão.

Nesse trabalho houve a utilização de dois dispositivos Xbee com comunicação ponto-a-ponto e utilização do Modo AT.

## 6 RESULTADO E DISCUSSÃO

Com o objetivo de realizar uma validação quantitativa do instrumento desenvolvido, foram realizados testes, a fim de comparar os resultados obtidos com os provenientes de um produto comercial (*Contec Medical Systems Co.Ltd*, modelo CMS50M) (SYSTEMS, 2017). A Figura 8 apresenta uma foto ilustrativa do procedimento realizado para a medição de  $SaO_2$  e da  $FC_{inst}$  com a unidade ótica desenvolvida, bem como do equipamento comercial supracitado.

Em testes iniciais com o equipamento foi comutado o estado dos LEDs, e obteve-se a forma de onda de saída do fotosensor, como apresenta a Figura 9. Pode observar na Figura 9 que a saída do TCS230 é uma onda quadrada com frequência proporcional a intensidade de luz.

A partir da saída do TCS230, é possível no microcontrolador obter a curva pleto-mográfica.

A curva pleto-mográfica do display do Raspberry Pi (Figura 10) foi obtida possibilitando assim os cálculos de  $SaO_2$  e da  $FC_{inst}$ . É possível também visualizar a curva via computador.

A fim de obter a certificação de que os dados recebidos pela central de monitoramento estavam corretos, foram plotadas ambas as curvas, obtidas via cabo e via ZigBee, na Figura 11.

Figura 8–Medição de saturação de oxigênio no sangue e frequência cardíaca.

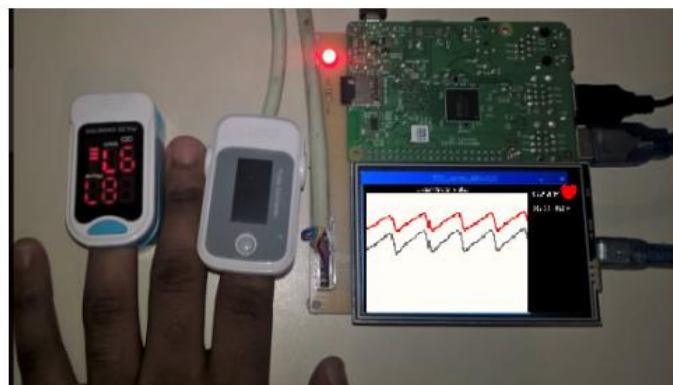


Figura 9–Saída do fotosensor TCS230.

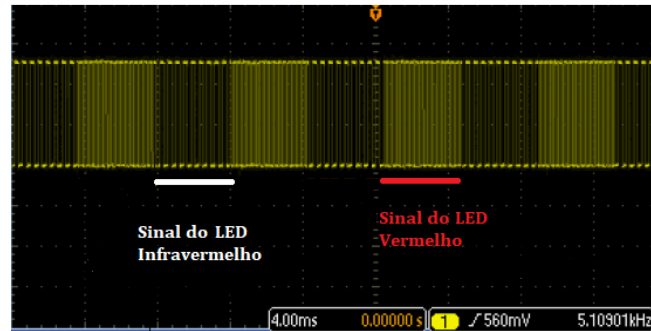


Figura 10–Curva pletoimográfica e  $SaO_2$  e  $FC_{inst}$  obtidas na interface gráfica.

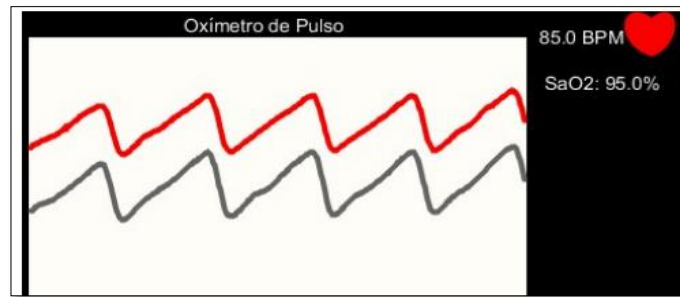
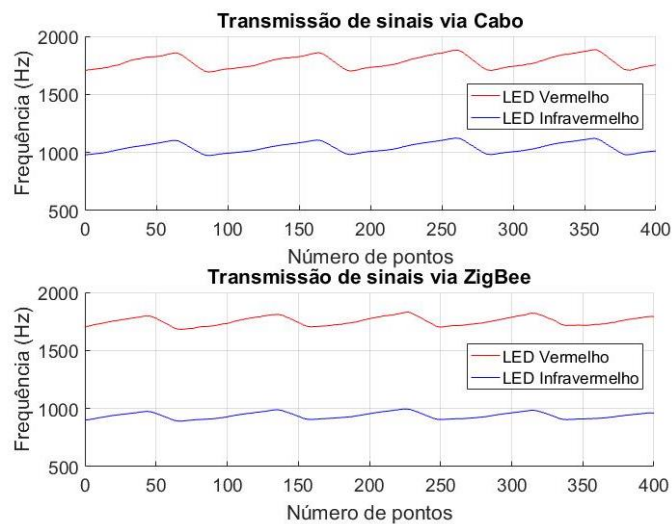


Figura 11–Transmissão de sinais.



Foi realizado o procedimento com 6 indivíduos e coletados os dados de  $SaO_2$ , apresentado na Tabela 1 e da  $FC_{inst}$  mostrada na Tabela 2. Em ambas as tabelas é possível observar a medição dos parâmetros pelo oxímetro CMS50M, e pela plataforma desenvolvida.

Na Tabela 1, a medição é feita ora com transmissão via cabo, ora via protocolo ZigBee e é apresentado os respectivos desvios relativos. Já para a Tabela 2, foram expostas apenas a medição via ZigBee, devido a mudança da  $FC_{inst}$  ocorrer com assiduidade.

Analisando os dados da Tabela 1 e Tabela 2, percebe-se que o desvio relativo entre o oxímetro de pulso desenvolvido e o comercial é próximo da faixa de erro apresentada pelo



oxímetro comercial, o que conclui que o equipamento desenvolvido é eficiente na medição dos parâmetros vitais.

Tabela 1. Medidas da saturação de oxigênio utilizando a plataforma desenvolvida.

<b>Resultados para Saturação de Oxigênio (SaO<sub>2</sub>)</b>				
<b>Oxímetro - CMS50M (%)</b>	<b>Oxímetro desenvolvido (%)</b>		<b>Desvio Relativo (%)</b>	
	Via cabo	Via ZigBee	Via cabo	Via ZigBee
95	92	93	3,16	2,11
97	95	95	2,06	2,06
99	97	97	2,02	2,02
97	96	96	1,03	1,03
97	96	97	1,03	0,00
96	95	94	1,04	2,08

Tabela 2. Medidas da frequência cardíaca utilizando a plataforma desenvolvida.

<b>Resultados para Frequência Cardíaca (FC<sub>inst</sub>)</b>		
<b>Oxímetro - CMS50M (BPM)</b>	<b>Oxímetro desenvolvido (BPM)</b>	<b>Desvio Relativo (%)</b>
87	85	2,30
63	62	1,59
77	75	2,60
92	95	3,26
83	84	1,20
82	83	1,22

## 7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este artigo apresentou um estudo para desenvolvimento de um oxímetro de pulso para a coleta de  $SaO_2$  e da  $FC_{inst}$  presentes em seres humanos.

O sistema desenvolvido foi dotado de *hardware* e *software* integrado a um microcontrolador para aquisição e cálculos, e, posteriormente disponibilizando a visualização local dos resultados de medições em um display LCD conectado diretamente ao um Raspberry Pi. Ainda, foi utilizado o protocolo ZigBee para envio dos dados via rede sem fio para um microcontrolador.

São apresentados os resultados de medições realizadas com seis indivíduos onde foram obtidas as curvas pletismográficas, coletados os valores de  $SaO_2$  e da  $FC_{inst}$ , a fim da comparação de resultados a partir de um oxímetro comercial. Para finalizar, atingiu-se o objetivo de construir um sistema de aquisição de oximetria de pulso com boa exatidão quando comparado com oxímetros comercialmente disponíveis no mercado.

### *Agradecimentos*

Agradecemos ao CEFET-MG (Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais) pelo suporte no desenvolvimento desta pesquisa.

## REFERÊNCIAS

- BRONZINO, J. D., **Biomedical engineering handbook**. Vol. 4, CRC press. 2015.
- CHAN, D; CHAN, M., **Pulse oximetry: Understanding its basic principles facilitates appreciation of its limitations**. Respiratory Medicine, Vol. 107, No. 6, pp. 789-799, 2013.
- KUMAR, T.; MANE, P. B., **ZigBee topology: A survey**. International Conference on Control, Instrumentation, Communication and Computational Technologies, pp.164–166, 2016.
- KUMAR, V. A.; KUMAR, M. J., **Reflectance Pulse oximetry using single light source**. Procedia Engineering , Vol 38, pp 2484–2490, 2012.
- MARTINS, R. M., **Desenvolvimento de um sensor de fotopletismografia para monitorização cardíaca para aplicação no pulso**. Dissertação de Mestrado, Departamento de Física, Universidade de Coimbra, Portugal, 2010.
- MUKHOPADHYAY, S. C. et al., **A Zigbee Based Wearable Physiological Parameters Monitoring System**, IEEE Sensor Journal, Vol. 12, No. 3, pp. 423-430, 2012.
- NEIL, T., **Pulse Oximeter**. Medical electronics, 2018
- SYSTEMS, C. M., **CMS50M Pulse Oximeter**. Disponível em: <http://www.contecmed.com>. Acesso em: 30 de outubro de 2018.
- WEBSTER, J. G., **Design of pulse oximeters**. CRC Press,1997
- YADAV, A.; AYUB, S., **Design and development of pulse oximeter**. International Journal of Advanced Technology in Engineering and Science, Vol.02; pp. 478- 484, 2014

## MICROCONTROLLED PULSE OXIMETER WITH GRAPHIC INTERFACE VIA RASPBERRY PI AND WIRELESS TRANSMISSION THROUGH THE ZIGBEE PROTOCOL

**Abstract:** *The development of a noninvasive device allows the application of several concepts transmitted during an engineering course, mainly electronics: electronic instrumentation, circuit design, signal processing and programming. Thus, the development of that device has levels of complexity and relevance to an engineering project. This context, this work describes the development of a pulse oximeter prototype that allows local and remote monitoring of patients' heart rate and oxygen saturation. The system was designed and implemented in a microcontroller. A color liquid-crystal display (LCD) connected directly to a Raspberry Pi are used to patients' local monitoring and using a ZigBee protocol, data is sent through the wireless network to a computer. The efficiency of data transmission was monitored and verified. Finally, analysis and comparison of oxygenation saturation and heart rate measurements obtained simultaneously with the developed system and a commercial oximeter are presented.*

**Key-words:** *Pulse oximetry, Oxygen saturation, Heart rate, Microcontrollers, ZigBee, Remote monitoring.*