

DESENVOLVIMENTO DE UMA INTERFACE MOBILE DE MONITORAMENTO DE UM CORAÇÃO ARTIFICIAL

DEVELOPMENT OF A MOBILE INTERFACE FOR MONITORING OF AN ARTIFICIAL HEART

Antônio Cesar Marques Alves ¹ Igor Wallace Hatakeyama Lima ² Data de entrega dos originais à redação em: 19/11/2016
 Vitor Simões Doná ³ Vitor Zitti Guariglio ⁴ e recebido para diagramação em: 28/07/2017
 Tarcísio Fernandes Leão ⁵

Os órgãos artificiais vêm ganhando cada vez mais destaque com a grande demanda de órgãos para transplante e a falta destes para suprir a necessidade da população. O aprimoramento da tecnologia permitiu o desenvolvimento de dispositivos que se tornassem mais próximos dos reais e permitam as pessoas uma nova esperança de sobreviver a doenças, antes fatais, devido ao tempo em que se aguardava o transplante. Porém, ainda existe a falta de um sistema para monitorar os pacientes que irão receber estes órgãos, já que, como qualquer aparelho eletrônico, eles estão sujeitos a falhas. O presente trabalho traz uma proposta de se monitorar 24 horas um coração artificial via um aplicativo de celular, desenvolvido pelo Instituto Dante Pazzanese de Cardiologia. O controlador do aparelho enviará dados medidos com os sensores do órgão artificial através de um Arduino Uno conectado à internet com auxílio de um Xbee Wi-Fi. Um banco de dados localizado em um site receberá os valores de BPM e os armazenará para manter uma base sempre disponível para a leitura do aplicativo. Foram feitos testes de comunicação entre Xbees, envio de dados do Arduino para o banco de dados, leitura de dados da internet e o funcionamento do sistema completo. Foi verificado que o sistema é eficaz, com um tempo de resposta inferior à 16 segundos, apresentando uma montagem simples e uma interface de fácil manuseio para médicos e engenheiros.

Palavras-chave: Coração Artificial. Xbee. Arduino. Órgão Artificial. Instrumentação

With the increasing artificial organ's popularity, due to its demand by organ transplantation, the improvement of such technology allowed the development of devices that can get really close to its originals. It also can bring hope for those who are waiting for a compatible organ for the transplantation procedure, so they can have a second chance against fatal diseases. Besides all of that, we still have a lack of monitoring systems to follow up with patients that will receive a new organ or already have one. It is known that every electronic device or artificial organ can fail, so we need to have someone or something looking for it uninterrupted. That is the purpose of this project. With the help of the Cardiology Department of Dante Pazzanese Hospital, and its Auxiliary Artificial Heart, we will develop a monitoring system that will send the signals generated by the sensors in the AAH to a mobile interface through Wi-Fi. This Wi-Fi device (a Zigbee XBee Wi-Fi) will send all the data to a database, such as heart beat and other variables. It is an efficient method with a quick time response of less than 16 seconds. Has an easy setup for the doctors and engineers in the near future.

Keywords: Artificial Heart. Xbee. Arduino. Artificial Organ.

1 INTRODUÇÃO

Segundo a Sociedade Brasileira de Cirurgia Cardiovascular, o Brasil, em 2012, era o segundo país em relação a quantidade de cirurgias cardíacas e com baixos índices de mortalidade chegando a se comparar até a países do primeiro mundo. Porém, o país sofre de uma baixa disponibilidade comercial na área de assistência ventricular. Logo, é importante incentivar estas pesquisas no país a fim de se desenvolver dispositivos que possam dar novas chances a pacientes cardíacos que necessitem de suporte circulatório sendo este servindo como ponte para um futuro transplante ou como órgão artificial totalmente implantável. Porém, sem um sistema de monitoramento adequado, os médicos e engenheiros não podem acompanhar o desempenho do dispositivo e identificar falhas o mais rápido possível (ANDRADE, 1998).

Atualmente o coração artificial desenvolvido pelo Centro de Engenharia em Assistência Circulatória (CEAC) do Instituto Dante Pazzanese de Cardiologia possui um sistema de monitoramento baseado na tecnologia Xbee, uma rede de comunicação *wireless* baseado no padrão ZigBee IEEE 802.15.4, sendo esta uma rede com excelente imunidade a interferências. Além de robusta, os dispositivos Xbee consomem pouca bateria, assim sendo ideais para situações onde a energia para funcionamento seja uma limitação. Porém, o dispositivo atual possui uma limitação da distância para comunicação.

Limitações como paredes acabam interrompendo a comunicação e com isso sendo inviável o monitoramento do órgão a grandes distâncias, como dentro do setor de UTI do hospital. Com isso, é necessário um sistema robusto de monitoramento e de fácil manuseio para o

1 - Engenharia de Controle e Automação. < antoniocma@me.com >
 2 - Engenharia de Controle e Automação. < iwhlima@yahoo.com.br >
 3 - Engenharia de Controle e Automação. < vitor_dona@hotmail.com >
 4 - Engenharia de Controle e Automação. < vitorzitti@yahoo.com.br >
 5 - Engenharia de Controle e Automação. < leao.tarcisio@gmail.com >

paciente, para o médico, que o acompanha, e para o engenheiro biomédico.

Para superar essa limitação, o presente trabalho busca desenvolver uma interface móvel de monitoramento que possa se comunicar via *Wi-Fi* com o coração artificial implantado. Para essa comunicação, foi disponibilizado pelo hospital um dispositivo *Xbee Wi-Fi* para que possa ser mantido este protocolo de comunicação robusto, porém aumentando a distância necessária para monitoramento do sistema, já que através de uma rede *Wi-Fi* pode-se monitorar de diferentes lugares do hospital o paciente.

Este trabalho faz parte do Projeto de Pesquisa Temático financiado pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), processo número 2013/24434-0, com vigência de abr/2015 à mar/2020, intitulado "Sistemas Propulsores Eletromagnéticos para Coração Artificial Implantável e Dispositivos de Suporte Circulatório Mecânico", mais especificamente do subprojeto 9: Controlador Eletrônico e Lógica de Controle para Bombas de Sangue Rotativas.

O uso da comunicação *wireless* em dispositivos médicos vem se tornando cada vez mais presente, especialmente com o avanço dos *smartphones* e o baixo consumo de energia destes eletrônicos, facilitando assim a forma de se monitorar desde o nível de açúcar no sangue ao batimento cardíaco de um coração auxiliar (UNIVERSITY OF WASHINGTON, 2016).

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Coração Artificial

O *TAH (Total Artificial Heart)*, ou Coração Artificial Total) em estudo é composto por três unidades: unidade de bombeamento, dispositivo de volume variável e os componentes elétricos. A unidade de bombeamento, também chamado de Subsistema *TAH* é composta de duas câmaras de bombeamento, atuador mecânico e um motor elétrico brushless. O dispositivo de volume variável previne com que haja uma pressão na região entre os diafragmas das câmaras de bombeamento de sangue. A terceira unidade é formada por componentes elétricos como os motores que foram hermeticamente selados com a ajuda da tecnologia da "Teledyne Micro-Electronics Inc.", EUA. Seu idealizador propõe o uso do *TAH* como um dispositivo auxiliar, preservando assim o coração natural, sendo chamado de Coração Artificial Auxiliar (CAA) (ANDRADE, A. J. P. de, 1998)

A superfície dos *TAH* são biolizadas e sua parte interna tratada com uma superfície hidrofílica de proteína fixada com glutaraldeído, não contendo fendas e sendo praticamente lisas. Isso leva a uma vantagem sobre outras bombas sanguíneas, demonstrando um alto desempenho com baixos índices de dissolução ou destruição de glóbulos vermelhos. Não havendo a necessidade do paciente ter que tomar remédios anticoagulantes, por exemplo (ANDRADE, A.J.P. de, 1998; PANTON e HEALEY, 1994; SALES e SMEDIRA, 2012).

Já o sistema de controle, através de sensores de posicionamento, obtém informações importantes como a posição do diafragma e dos roletes. Por exemplo, caso o retorno de sangue venoso aumente, a ejeção ocorre simultaneamente do lado direito do coração e a frequência cardíaca do coração auxiliar aumentará. Sendo assim, o

ciclo cardíaco entre dois ventrículos será o tempo de ejeção de um e o enchimento de outro. O *TAH* fora projetado para oferecer uma vazão de 8 litros de sangue por minuto com uma pressão de entrada menor que 10 mmHg (ANDRADE, A.J.P. de, 1998; SALES e SMEDIRA, 2012).

Apesar do assunto ser relativamente novo, já houve grandes mudanças nos corações artificiais no decorrer dos anos. Diversas melhorias já foram realizadas, antigamente os pacientes tinham que andar com cintos pesados de bateria, os corações implantáveis pesavam quase o triplo de um coração real. Leveza, boa vida útil e confiabilidade são os três aspectos básicos que um coração artificial deve ter. A confiabilidade é um ponto chave pois trata-se de um órgão vital, com muitas partes móveis que podem estar sujeitas à falhas, necessitando de um controle constante, pois o corpo pode passar por diferentes situações do dia a dia que possam requerer um esforço maior do coração. Um exemplo de confiabilidade é a temperatura gerada pelos componentes elétricos e dissipadas para o sangue, coração e corpo. Deve se ter uma quantidade máxima de energia térmica gerada para que não haja algum efeito colateral ou complicação médica (PANTON e HEALEY, 1994).

2.2 Xbee

Xbee é uma tecnologia de baixo custo e baixo consumo o qual foi introduzida por uma aliança formada pelas empresas: *Motorola, Honeywell, Philips, Invensys* e a *Mitsubishi Electric* em outubro de 2002. Este dispositivo opera em uma banda de 2,4 GHz com uma taxa de transferência de 250 kbps e suporta comunicação P2P (sigla de par-a-par, do inglês peer-to-peer) e ponto a multiponto. Possui vantagens quando comparada a tecnologias *wireless* como o *Bluetooth* e a *Wi-Fi*, pois trabalha com uma distância maior que a primeira e o consumo menor que o último. Quando em modo *Sleep*, ele pode acordar rapidamente e com isso diminuir muito seu consumo de energia. Ela pode se comunicar com diferentes periféricos e pode ser usado desde na automação residencial a monitoramento de frequência cardíaca (KUMMAR et al., 2014).

Independente da informação, tudo no computador é transmitido em forma de 1 e 0, os conhecidos *bits*. Quando os dados são lançados na internet, eles são divididos em pequenos pacotes, cada um possuindo um rótulo que identifica o endereço para o qual ele deverá ser enviado, essa informação passa então pelos roteadores, que são computadores entre a origem do pacote e o destino, que decidem qual o melhor caminho que este conjunto de dados deve realizar para chegar ao seu objetivo. Ao terminar o envio o receptor confirma a chegada do pacote e comunica perda de dados, caso houver (CLARK, 1983; EURIM, 1999).

A maioria das hospedagens de dados ocorre na forma de *Web Sites*, um conjunto de informações em forma de textos e imagens que geralmente utilizam o protocolo HTTP (sigla para Protocolo de Transferência de Hipertexto, do inglês HyperText Transfer Protocol). Outra forma de armazenamentos de dados, relacionados à internet, são os servidores. Estes se caracterizam por um sistema de computadores que fornecem serviços que incluem acesso à *Web Sites*, envio de *e-mails* e transmissão de dados, mensagens, etc (CLARK, 1983; EURIM, 1999).

2.3 Arduino

O Arduino é uma plataforma de prototipagem desenvolvida com um microcontrolador Atmel AVR, utiliza-se essencialmente das programações C e C++. Lançado em 2005, foi desenvolvido para projetos escolares que necessitavam de uma prototipagem com um orçamento menor do que as outras plataformas desenvolvidas na época. Uma praticidade desta tecnologia é a existência de uma vasta comunidade capaz de tirar dúvidas que novos usuários possam vir a ter. (ARDUINO, 2016).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Hardware

O hardware do sistema é responsável pela captação de dados do coração e envio para o banco de dados no qual o aplicativo estará conectado. A figura 1 demonstra o fluxo das informações do hardware.

O coração artificial possui sensores de efeito *hall*, como fim de curso, os quais medem os tempos de ejeção do ventrículo esquerdo, de ejeção do ventrículo direito e de enchimento do sistema. O controlador recebe os dados e os envia para o Arduino, sendo essa conexão feita através dos pinos GND de ambos e o RX do Arduino ligado ao TX do controlador, o mesmo utiliza como microcontrolador o AT89S8252. Após o recebimento dos dados, calcula-se o batimento por minuto (BPM) por meio da média dos últimos cinco ciclos e com isso se tem os quatro dados a serem disponibilizados ao usuário. O *Xbee Wi-fi* fica conectado através de um *shield* e permite a conexão com o banco de dados online. O envio de dados ocorre a cada 15 segundos, podendo variar de acordo com a conexão disponível. A figura 2 mostra como foi feita a montagem do *hardware* para os testes e a figura 3 apresenta o coração artificial.

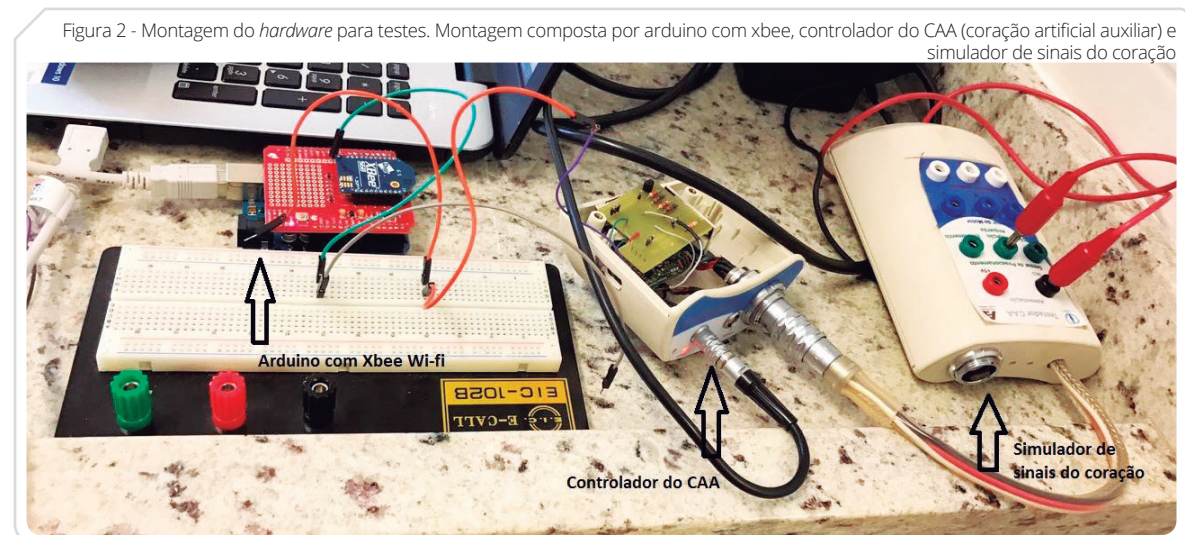
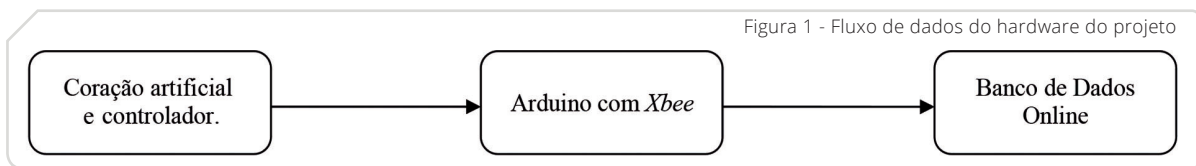
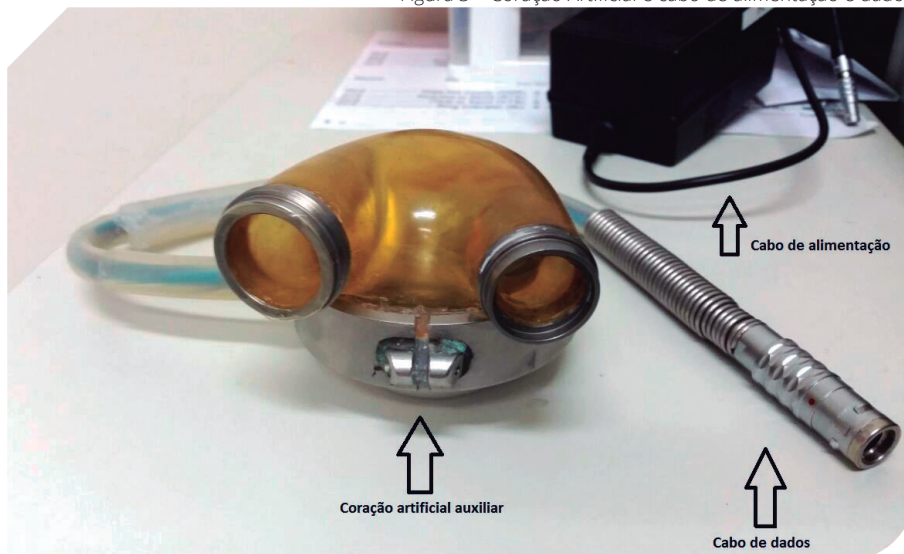


Figura 3 - Coração Artificial e cabo de alimentação e dados



Para garantir o funcionamento e a eficácia do *hardware*, foram feitos quatro testes. No primeiro, foi verificado a distância entre o hardware e o modem para manter o bom funcionamento do sistema. Para isso utilizou-se um celular como modem e variou-se a distância de 1 a 5 metros, além dos dois dispositivos estarem em salas separadas.

No segundo, variou-se a frequência cardíaca do coração e verificou-se se o *hardware* conseguia perceber essa variação. Foi utilizado um cronômetro para medir a frequência real.

No terceiro, simulou-se uma falha no coração real. Para isso, utilizou-se o Simulador Híbrido do Sistema Cardiovascular (SHSC) que é composto de duas seções, computacional e física, simulando assim o funcionamento do coração esquerdo e direito. Pode-se configurar os parâmetros de contratilidade do ventrículo esquerdo, frequência cardíaca, resistência vascular sistêmica, entre outros. Ocorrendo a falha, aumenta-se o tempo para enchimento do dispositivo e com isso foi analisado se o sistema apontava essa mudança, para isso o Arduino foi programado para enviar como BPM o valor -2, assim indicando o erro.

Por fim, no último teste foi verificado se, em caso de erro na comunicação do controlador e o Arduino, o último verificaria o erro e enviaria como BPM o valor de -1, indicando a falha na comunicação.

3.2 Software

O Arduino foi programado utilizando a sua linguagem padrão. O programa é responsável pela conexão do sistema físico com a rede de internet, pelo tratamento dos dados recebidos e cálculo do BPM.

Para desenvolvimento da interface gráfica foi utilizado a *IDE Android® Studio®*. O *software* pode ser executado em qualquer *smartphone* com sistema

operacional *Android®* a partir da versão 2.0. Foi criada uma senha de segurança para impedir que qualquer usuário tenha acesso aos dados recebidos do Coração Artificial. O aplicativo possui um tempo pré-definido de 15 segundos para atualização automática do sistema e recebimento dos novos dados adicionados ao banco. A interface possui uma legenda para explicar a unidade de medida dos tempos recebidos e os valores que indicam dois tipos de falhas comuns no sistema: Na comunicação e no coração. Além disso, há dois botões para ligações rápidas no qual podem ser cadastrados até dois números emergenciais, sendo que por padrão um deles é o número 192 referente à ambulância. A figura 4 mostra a interface de monitoramento.

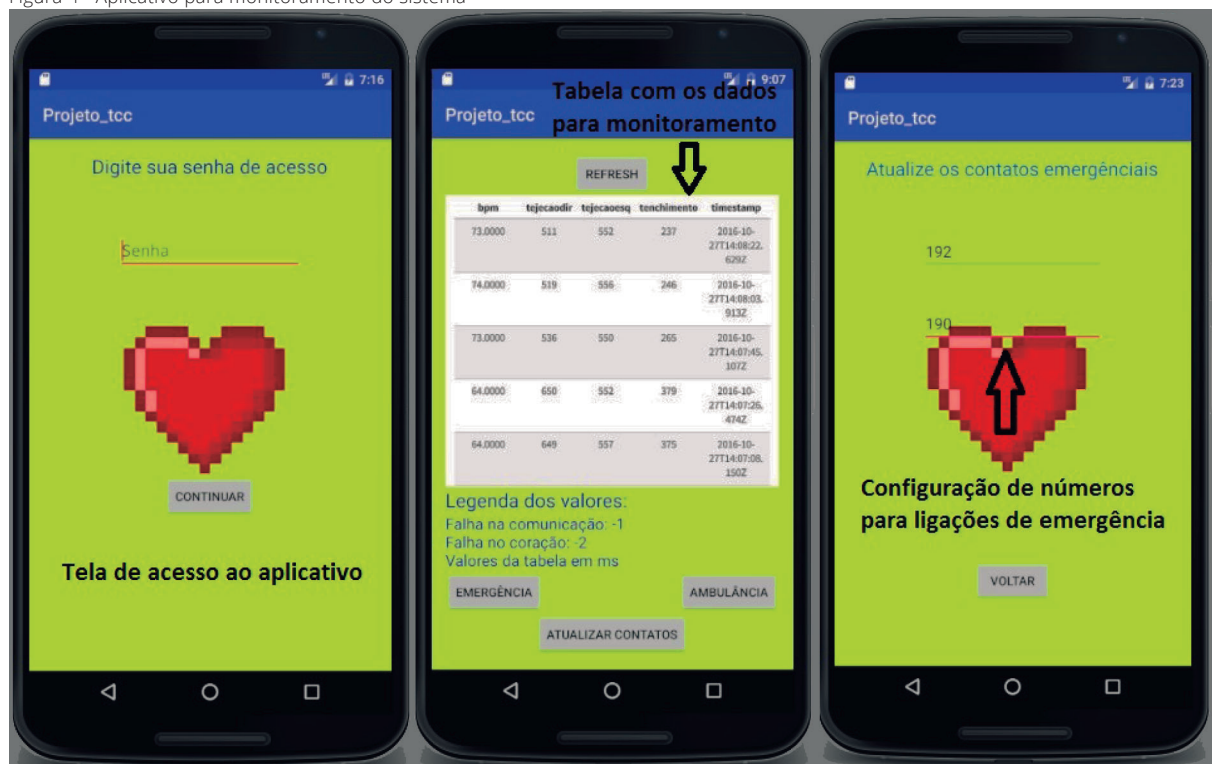
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O primeiro teste visou identificar se o *Xbee Wi-fi* utilizado no sistema atual tinha alguma limitação de distância com relação a sua conexão. Com o modem e o sistema em salas separadas, variou-se a distância conforme a Tabela 1 e verificou-se se ocorriam falhas de conexão. A distância máxima escolhida foi com base na informação de que o paciente que receber esse dispositivo ficará na UTI sendo monitorado 24 horas por um médico. Com isso, cinco metros seriam uma distância considerada bem próxima da real entre o paciente e o responsável pelo monitoramento.

Tabela 1 - Variação da distância e verificação de falha no envio de dados no teste 1

Distância (m)	Falha no envio de dados?
1	Não
2	Não
3	Não
4	Não
5	Não

Figura 4 - Aplicativo para monitoramento do sistema



Alimentação de distância que o sistema possui atualmente foi superado com a adição do Xbee Wi-fi e o uso da rede wireless de Internet, pois com o range de trabalho dos modems atuais sendo cada vez maior, aumenta a autonomia do médico poder estar acompanhando outros pacientes enquanto monitora o sistema do coração artificial e verifica possíveis falhas para uma tomada de ação rápida, assim podendo salvar a vida do paciente.

O segundo teste teve como objetivo verificar se o sistema detecta possíveis mudanças na frequência cardíaca do paciente, visto que a mesma pode variar com o passar das horas. Duas frequências padrões foram usadas neste teste: 72 e 65 BPM. Conforme a mudança ocorria, verificou-se a margem de erro na medida dos batimentos. A Figura 1 apresenta as variações nas leituras e nos batimentos medidos no simulador:

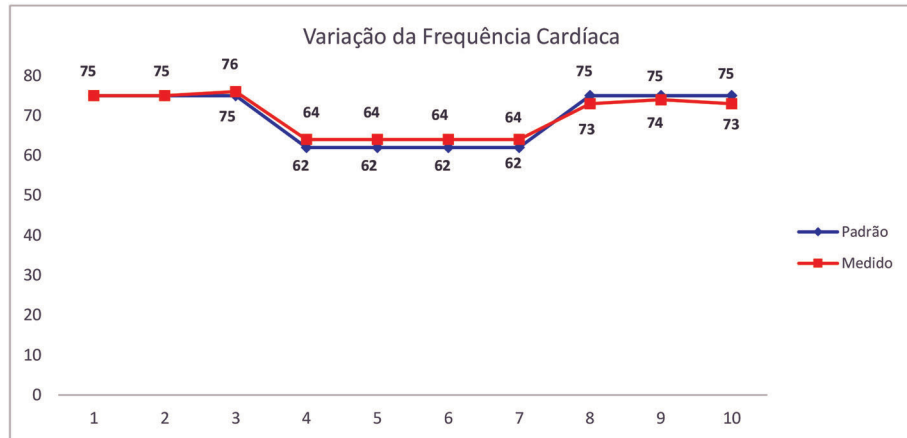
A margem de erro do sistema ficou em torno de ± 2 BPM, o que pode ser considerado aceitável visto que é uma diferença pequena e que não influenciaria na decisão do médico. Como também foi utilizado um cronômetro para verificação da frequência real, erros de medida podem ter ocorrido durante os testes. Dado que o sistema envia dados em média a cada 15 segundos, esse é o tempo médio que o sistema demoraria para reconhecer alguma diferença de batimentos cardíacos, algo também considerado aceitável já que é um intervalo bem curto para reconhecer mudanças na frequência cardíaca do paciente.

O terceiro teste tinha como objetivo verificar se o sistema detectaria falhas no coração real do paciente. Para isso, utilizou-se um simulador do coração real que alimentaria o artificial. Após desligar o simulador, o sistema verifica se o tempo de enchimento é superior a 500 ms, tempo programado no *watchdog* do controlador, para verificar se houve alguma falha, caso seja maior que isso será enviado um valor padrão de -2 BPM no próximo envio de dados ao banco. Aplicando o teste e verificando tempo de atraso no enchimento e medindo a resposta no aplicativo foram obtidos resultados que mostram o tempo máximo de 17 segundos para a visualização, assim avaliando a eficácia do sistema, conforme tabela 2.

Tabela 2 - Tempo de atraso do enchimento e dado enviado ao banco de dados

Tempo de atraso (s)	Valor enviado (BPM)
0	70
17	-2
32	-2
46	-2
64	-2
80	-2
97	-2
111	-2

Gráfico 1 - Variação da frequência cardíaca e os valores medidos pelo sistema



Conforme os dados obtidos, a partir dos treze segundos de atraso o sistema enviou o valor de -2 BPM. A margem de erro foi considerada aceitável, dado o tempo ser medido via cronômetro e as falhas de calibração do mesmo e humanas poderem estar presentes. A verificação de segurança deste caso é essencial caso o médico não tenha percebido a queda nos batimentos do paciente, dando a oportunidade de uma ação ser tomada rapidamente.

O quarto teste visou detectar falhar na comunicação do controlador e do Arduino. A forma para medir tal falha foi aguardar em torno de dez segundos após o último dado recebido e, em caso o sistema não receber nenhum novo valor, seria enviado para o banco de dados o valor -1 BPM. Para fazer esse teste desligou-se a comunicação entre os dispositivos e aguardou-se o tempo estipulado. A tabela 3 apresenta os tempos sem comunicação e o valor enviado para o banco.

Tabela 3 - Tempo sem conexão e dado de BPM enviado para o banco de dados

Tempo sem conexão (s)	Dado enviado (s)
10	0
29	-1
48	-1
65	-1
84	-1
102	-1
120	-1

O sistema aguardou 29 segundos, no teste efetuado, para enviar o valor de BPM -1. Esse valor varia do pré-determinado devido a conexão Wi-fi utilizada, já que a qualidade da mesma pode variar o intervalo de envio de dados ao banco. O sistema se mantém estável com este valor, com isso o sistema mostrou um bom tempo de resposta à falha, mostrando confiabilidade do projeto.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O sistema de monitoramento do coração artificial é um importante desenvolvimento para aumentar a segurança em avaliações clínicas do CAA. Além dos benefícios diretos ao paciente, teremos num futuro

próximo a facilidade que a “Internet das Coisas” nos possibilita, no qual médicos e engenheiros poderão acompanhar ininterruptamente a situação de seus pacientes via aplicativos depara *smartphones* e tomar as devidas ações à distância.

O sistema atual implementado no coração artificial possui limitações de conexão, permitindo que o monitoramento seja exclusivamente no mesmo ambiente do paciente. A interface gráfica instalada em um computador, não amigável para não-engenheiros, dificulta a monitoração do dispositivo e do paciente. A solução fornecida no presente trabalho visa tornar o sistema de monitoramento simples, com uma autonomia maior de distância do dispositivo com o *modem* para envio dos dados. Permitindo que a equipe médica possa monitorar o paciente de forma remota, graças à comunicação do *hardware* com o banco de dados acessível de qualquer lugar e a qualquer hora.

O *Xbee Wi-fi* mostrou-se um dispositivo simples para configurar e robusto na comunicação. O sistema respondeu bem às perturbações simuladas, sempre enviando sinais de falha dentro de um intervalo de tempo considerado bom, assim dando ao médico e ao engenheiro biomédico tempo adequado para monitorar o paciente. A margem de erro nas medidas também está dentro de um intervalo aceitável, já que são variações consideradas pequenas, podendo melhorar com o uso de sensores mais precisos. Pode-se considerar que o sistema atende as necessidades atuais do sistema, melhorando e facilitando o monitoramento do coração artificial nas avaliações clínicas.

A principal limitação do sistema desenvolvido é o aplicativo não enviar nenhum alerta em caso de falha, tanto de comunicação quanto do coração natural. Essa limitação se dá devido ao *Android*® não ser compatível com valores gerados via *javascript*, já que o banco de dados utilizado recebe os dados e os disponibiliza na web através dessa linguagem. A biblioteca que poderia auxiliar na leitura dos valores nesse formato não funciona atualmente, aguardando uma nova atualização do *software Android Studio*®. Porém, esta seria uma funcionalidade além do escopo deste projeto.

Como sugestão para trabalhos futuros, é necessário desenvolver um sistema de criptografia dos dados. Além disso, o desenvolvimento do aplicativo para

o sistema iOS permitiria cobrir uma área muito maior de usuários, dado o avanço das duas plataformas de *smartphones*. Por fim, permitir que o aplicativo possa enviar dados de controle para o *Arduino*® e o mesmo possa atuar no controlador aumentaria a interação entre o médico, o dispositivo e o paciente.

REFERÊNCIAS

ANDRADE, A.J.P. **Projeto, protótipo e testes “in vitro” e “in vivo” de um novo modelo de coração artificial total (TAH) por princípio eletro-mecânico de funcionamento.** 1998. 230f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia Mecânica - Universidade de Campinas, Campinas. 1998.

ARDUINO. Disponível em: <<https://www.arduino.cc/>>. Acesso em: 8 ago. 2016.

CLARK, A. P. **Principles of digital data transmission.** London, Pentech Press, 1983, 312 p., v. 1, 1983.

EURIM, **Internet Technology Explained: Hosting, Caching and Mirroring.** Network Governance Working Party, REINO UNIDO, 2009.

GOOGLE. Android Studio. Disponível em: < <https://developer.Android.com/> >. Acesso em: 8 ago. 2016.

JAUHAR, Sandeep. **The artificial heart** *New England Journal of Medicine*, v. 350, n. 6, p. 542-544, 2004.

KUMMAR et al. **Smart Irrigation Using Low-Cost Moisture Sensors and Xbee-based Communication,** IEEE 2014 Global Humanitarian Technology Conference. 2014.

PANTON, R.L.; HEALEY, W.V. **Total artificial heart.** U.S. Patent n. 5, 300,111, 5 abr. 1994.

SALE, S. M.; SMEDIRA, N. G. Total artificial heart. **Best Practice & Research Clinical Anaesthesiology**, v. 26, n. 2, p. 147-165, 2012.

SOCIEDADE BRASILEIRA DE CIRURGIA CARDIOVASCULAR. Disponível em: < <http://www.sbccv.org.br/medica/default.asp>>. Acesso em: 8 ago. 2016.

UNIVERSITY OF WASHINGTON, **Implanted Devices Can Talk Through Wi-fi,** Medical Design Briefs, 2016.