

Protótipo Robótico de Baixo Custo para Performance Musical em Violão Acústico

Higor A. F. Camporez, Trajano S. R. Mota, Leandro Costalonga, Helder Rocha

CEUNES – Universidade Federal do Espírito Santo (UFES)
Rodovia BR 101 Norte, Km. 60, Bairro Litorâneo, CEP 29932-540, São Mateus – ES

{higorcamporez, trajanoreuter}@gmail.com,
{leandro.costalonga, helder.rocha}@ufes.br

Abstract. *The research field of electronics applied to music technology goes beyond the improvement of audio quality. Robotics have been largely used in educational projects but rarely in the computer musical context. This paper presents a robotic device capable of performing on an acoustic guitar. The project was developed as a part of an extension project that encourage undergrad students to build musical projects. The description of the device and its musical and technical limitation are presented. Regardless of the musical quality, a demonstration video can be seen at visualizada em <https://youtu.be/dS3c-ZuiV7g>.*

Resumo. *O emprego da eletrônica no desenvolvimento de tecnologia musical não se limita a questões de qualidade do áudio. O uso da robótica como estratégia de ensino é amplamente difundida mas ainda pouco explorada no contexto ensino computação musical. Este artigo apresenta um dispositivo robótico projetado para executar performances musicais em violão acústico. Tal dispositivo foi desenvolvido como parte de um projeto de graduação no contexto de um projeto de extensão que visa oferecer a oportunidade de aplicação do conhecimento em projetos musicais. A descrição do dispositivo robóticos e suas limitações musicais e técnicas são apresentadas nesse artigo. Obstante a qualidade musical, uma demonstração do protótipo pode ser visualizada em <https://youtu.be/dS3c-ZuiV7g>.*

1. Introdução

A relação entre a música e eletrônica não é nova (Hiller, L., & Beauchamp, J 1965). A criação de novos instrumentos eletrônicos propiciam explorar novas sonoridades assim com novas técnicas de expressividade musical (Miranda, E. R., & Wanderley, M. M. 2006). Com o desenvolvimento e popularização da computação e eletrônica, usuários atualmente podem prototipar seus próprios instrumentos musicais (Berdahl, E., Salazar, S., & Borins, M. 2013) visando experimentação sonora ou ampliação de técnicas de performances musicas devido a limitações inerentemente humanas (Costalonga, 2009). Nesse contexto, robobres capazes de tocar um instrumentos musicais se tornam realidade (Singer et. al. 2004).

O uso da robótica como estratégia de ensino foi amplamente discutido por Alimisis et. al. (2007). Desde 2013, o emprego de estratégias de ensino construtivistas vem sendo

usada nos projetos de ensino ligados ao NESCoM, em especial no projeto Campus Vivo (Costalonga, 2013). Projetos dessa natureza oportunizam a consolidação do aprendizado através a aplicação direta do conhecimento em projetos multidisciplinares que, direta ou indiretamente, envolvem a computação musical. Exemplos dessa integração perpassa pelo ensino da programação através de uma linguagem sônica, programação de trilhas para vídeo game, desenvolvimento de instalações multimídia interativas e, como tratado nesse artigo, desenvolvimento de robôs visando a criação de um festival de música robótica nos moldes da Robocup (Kitano et. al., 1997)

O presente artigo descreve um protótipo de robô projetado para tocar violão acústico. O robô é composto de 3 partes que se comunicam: a) dispositivo deslizante de mão esquerda; b) dispositivo de deflexão de corda de mão esquerda; c) dispositivo de excitação de cordas de mão direita. Cada um desses módulos serão apresentados com maiores detalhes nas seções subsequentes. Na Seção 2 são apresentados os detalhes do hardware usado para simular a mão direita, mão esquerda e o dispositivo deslizante de mão esquerda. Na Seção 3 é apresentado o hardware usado para fazer sincronização entre os dispositivos de mão direita e mão esquerda. A Seção 4 descreve o algoritmo de sincronização implementado usando o micro-controlador Arduino. Resultados e dificuldades encontrados são comentados na Seção 5. Por fim, a Seção 6 apresenta as principais conclusões baseadas nos resultados obtidos.

2. Descrição do Hardware

A popularização de materiais eletrônicos como o Arduino e seus derivados vem auxiliando o desenvolvimento de protótipos com ótimo desempenho, baixo custo e fácil implementação, além de possibilitar um melhor aprendizado na parte prática de certas disciplinas (de Souza, A. R. al., 2011). Um dos pilares desse trabalho é favorecer o uso de materiais de baixo custo eletrônicos na confecção de um protótipo robótico para performance musical. Assim, nesta secção, são descritos os equipamentos eletrônicos usados para simular o comportamento de um violonista.

2.1. Mão direita (MD)

A mão direita do violonista (destro) desempenha uma função rítmica nas performances em violão (Reboursière, L. al., 2012). Deste modo, um dispositivo foi especialmente desenvolvido para esse fim, ou seja, tal dispositivo pode excitar uma corda específica (ou até todas), em um determinado ritmo pré-programado. No dispositivo de mão-direita são utilizados seis servomotores, estando cada um posicionado logo acima de sua específica corda. O servomotor usado pode ser visto na Figura 1.

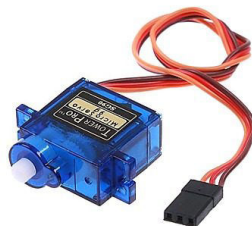


Figura 1. Servomotor

Observe na Figura 1, que a haste do servomotor é muito curta, não sendo possível posicioná-los de modo que alcancem a corda. Logo, foi necessário ampliar o comprimento da haste. Como citado anteriormente, uma das premissas do projeto é o reuso de materiais eletrônicos descartados, favorecendo seu baixo custo. Assim sendo, utilizou-se uma capa rígida de fio de alimentação, encontrada em sucatas disponíveis no laboratório da própria universidade, para fazer estender a haste e agir como palheta/unha de um violonista.

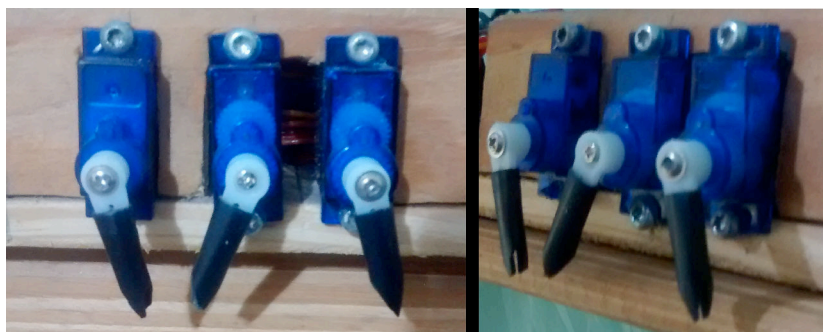


Figura 2. Servomotores com “palhetas”

Para fixação dos motores, utilizou-se uma estrutura de madeira reciclada. Os motores foram fixados ao suporte, e o mesmo foi posicionado acima da cavidade do violão conhecida como boca. O suporte foi pensado de modo que sua altura pudesse ser regulada, permitindo ajustar mecanicamente a intensidade da excitação da corda pela haste do servomotor.

O sistema é alimentado por uma fonte independente de 5V. A necessidade da utilização de uma fonte independente se deve ao fato do alto consumo de corrente de cada servomotor, cerca de 250 mA. A fonte alimenta os motores e o Arduino, que também funciona com 5V. Cada servomotor é conectado a uma saída PWM (*Pulse-Width Modulation*) do Arduino, que permite o controle do pulso em cada motor, para então, o controle do ângulo de rotação do mesmo. Deste ponto em diante todo processo é feito por meio de programação. Não foi necessário implementar circuitos auxiliares, visto que o servomotor já contém seu próprio sistema de controle.

Com o auxílio da biblioteca `servo.h`¹ é possível mandar um valor específico em graus para o motor, onde o próprio interpreta o pulso PWM e rotaciona até a posição desejada. Ao ligar o sistema, devem-se colocar todos os servomotores em uma posição inicial, assim, sincronizando o software com o hardware. Para que isso seja possível, é dado um pulso nos seis motores para colocá-los todos na mesma posição. O próximo passo é identificar a corda que deve ser tocada, o que depende da música, logo, é aplicado um pulso no servomotor referente a corda requerida, girando 25° (ângulo adquirido empiricamente) no sentido de tocar a corda. A programação do arpejo utilizado em cada acorde é pré-definido utilizando a função `delay()`². Caso seja necessário excitar simultaneamente todas as cordas envolvidas na performance do acorde, basta aplicar os pulsos nos servomotores sem o uso da função.

2.2. Mão esquerda (ME)

A formação de um desenho de acorde perpassa pela interrupção das cordas contra determinados trastes no braço do violão. Tal procedimento efetivamente encurta o comprimento da corda e, conseqüentemente, altera sua frequência de sua vibração (nota

musical). Essa interrupção mecânica é normalmente feita usando os dedos da mão esquerda do violonista (Costalonga 2009). No contexto desse trabalho, tal processo foi recriado eletromecanicamente através de uma matriz de solenóides que representa a mão esquerda do violonista. Uma solenoide é ilustrada na Figura 3.

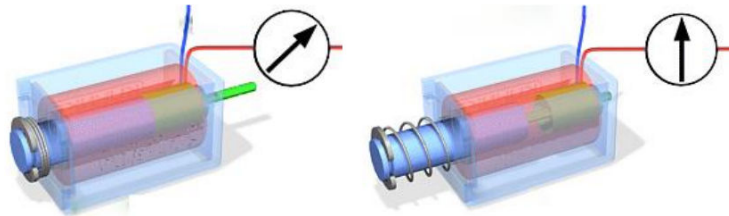


Figura 3. Solenóide ativo/inativo

Na solenoide, caso a mesma seja energizada, ocorre a criação de um campo magnético que induz uma haste de metal no sentido do campo. Existe uma mola que retorna a haste a sua posição inicial caso não esteja energizada. O deslocamento da haste efetua a função de apertar a corda contra o traste, função que normalmente seria feita pelo dedo do violonista. Cada solenoide utilizada consome em média 1A para que possa mudar de posição com a força necessária para pressionar a corda contra o traste - a tensão varia entre 5 e 9V. Considerando o pior cenário, onde 6 cordas seriam requisitadas simultaneamente, 6A de corrente serão necessários, assim, o circuito precisa de uma fonte externa que suporte alimentar tal sistema. Para a fixação dos solenóides criou-se um suporte de madeira. Visto que a matriz é uma estrutura rígida e há a necessidade de preencher 4 casas simultaneamente para formar os desenhos de acordes que deseja-se suportar nesse projeto, seriam necessários 24 solenóides dispostos em uma matriz 6X4. Como se trata apenas de um protótipo, foram utilizados apenas 4 solenóides, como mostra a Figura 4, para que os testes pudessem ser efetuados. Ainda, considerando que a extremidade da haste do solenoide é metálica e escorregadia, foram utilizados pedaços de borracha para simulação da digital do dedo humano.

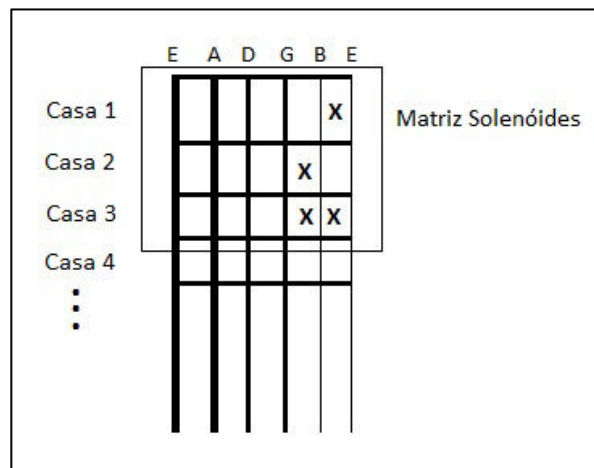


Figura 4. Disposição dos solenóides na matriz

Para o controle dos solenoides, foi criado um circuito de chaveamento feito com transistores TIP 122 e resistores, pois somente o Arduino não consegue fornecer a corrente necessária sem que seu circuito seja danificado, visto que a máxima corrente de cada porta digital é apenas 40mA. Cada pino digital transmite uma tensão de +5V caso esteja em estado *HIGH*, assim, para que um solenoide seja ligado, deve-se mudar o estado do pino. Para garantir que a corrente não ultrapasse o limite suportado pelas porta do Arduino, foram utilizados resistores de 220 ohms, assim, $\frac{5 - 0,7}{220} \cong 19,54 \text{ mA}$, que é suficiente para colocar o transistor em estado de condução, fazendo o seu chaveamento. Vale ressaltar que o valor 0,7V é proveniente do terminal de junção base-emissor do transistor. O controle de ativação/desativação de cada solenoide é implementado no Arduino alterando os estados dos pinos de *LOW* para *HIGH* e vice-versa. Ao ligar o sistema, todos os pinos conectados aos solenoides recebem o estado *LOW*, pois para que a matriz se movimente corretamente nenhum pino pode estar pressionado. A Figura 5 demonstra o circuito de chaveamento.

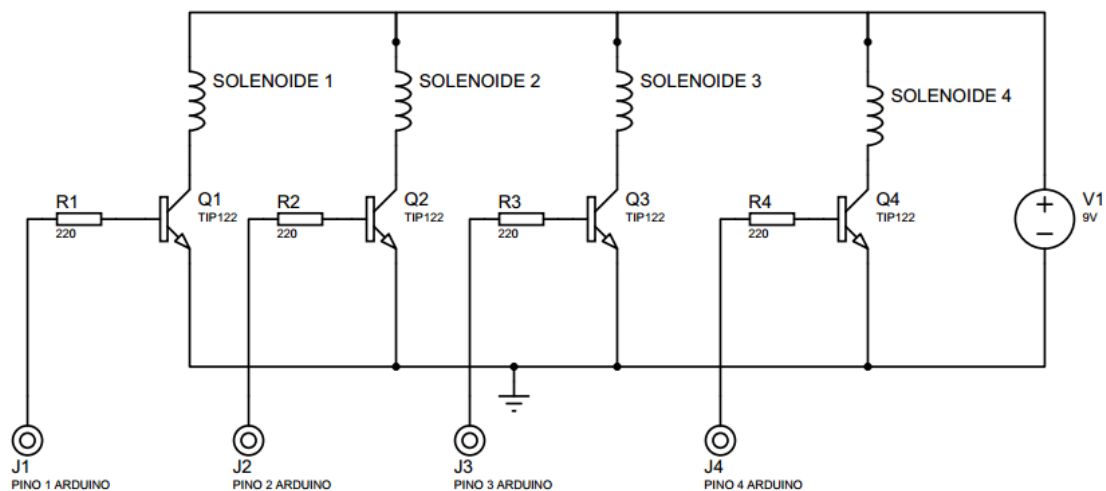


Figura 5. Circuito de Chaveamento

Além do movimento que permite pressionar as cordas, também há o movimento de translação da matriz pelo braço. O mecanismo que possibilita tal movimento veio de impressora descartada, onde aproveitou-se o suporte de cartucho e o sistema de deslizamento. O motor que faz o movimento da matriz, é do tipo DC de 24V. Caso o mesmo seja alimentando diretamente com os 24V que necessita, o movimento do braço é muito rápido, sendo difícil controlá-lo com precisão. Então, foram usadas portas do Arduino que possuem saída PWM, fazendo com que o motor continue com o mesmo torque e possibilitando o controle de sua velocidade. Para que fosse possível o movimento para ambos os lados, usou-se uma ponte H, implementado no circuito integrado L293D, como mostra a Figura 6.

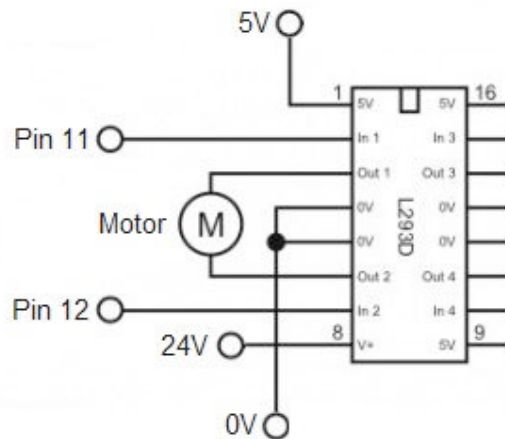


Figura 6. CI ponte-H

Para garantir o correto alinhamento da matriz com os trastes, utilizou-se um sensor ultrassônico como mostrado na Figura 7. O sensor posicionado próximo a junção do corpo do violão com o braço emite uma onda ultra-sônica que rebate na matriz que foi usada como objeto de referência. O tempo de retorno da onda é usado para determinar a distancia entra as partes. Para que tudo isso seja possível, foi elaborado um programa no Arduino que possibilita o controlar com precisão a distância. No programa, há uma função em que recebe como paramento o valor da casa em que a matriz deve se posicionar para formação de um especifico acorde ou nota, valor esse obtido empiricamente. Com o valor recebido do sensor, um sinal é enviado para o motor girar para a esquerda ou direita, ajustando a posição da matriz no braço. Ao chegar à posição desejada, o motor fica parado, até que receba outra chamada com uma nova localização.



Figura 7. Sensor Ultrassônico

3. Sincronização do hardware

Um único Arduino Mega 2560 foi utilizado no projeto, ficando o mesmo também responsável pela sincronização do Hardware entre as 3 partes do mecanismo robótico: dispositivo deslizante de mão esquerda, dispositivo de deflexão de corda de mão esquerda, dispositivo de excitação de cordas de mão direita. O Arduino Mega 2560 é baseado no microcontrolador ATmega2560, possuindo 54 pinos de entradas e saídas digitais, onde 15 tem propriedade PWM. Possui ainda 16 entradas analógicas com resolução de 10 bits, 4 UARTs, cristal oscilador de 16 MHz.

Dados os 6 servomotores foram necessárias 6 portas de saídas PWM, sendo utilizadas as portas de 2 a 7, refletindo nas cordas do violão 1 a 6, respectivamente. Para os solenoides precisou-se de apenas 4 portas digitais de saída (22, 24, 26 e 28). Já o sensor

ultrassônico necessitou de uma entrada digital e uma saída digital, assim, utilizou-se as portas 8 e 9 respectivamente. Por fim, o controle do motor DC foi feito com duas portas de saída PWM, sendo as escolhidas a 11 e 12. A Figura 8 ilustra a utilização das portas através do esquemático do protótipo.

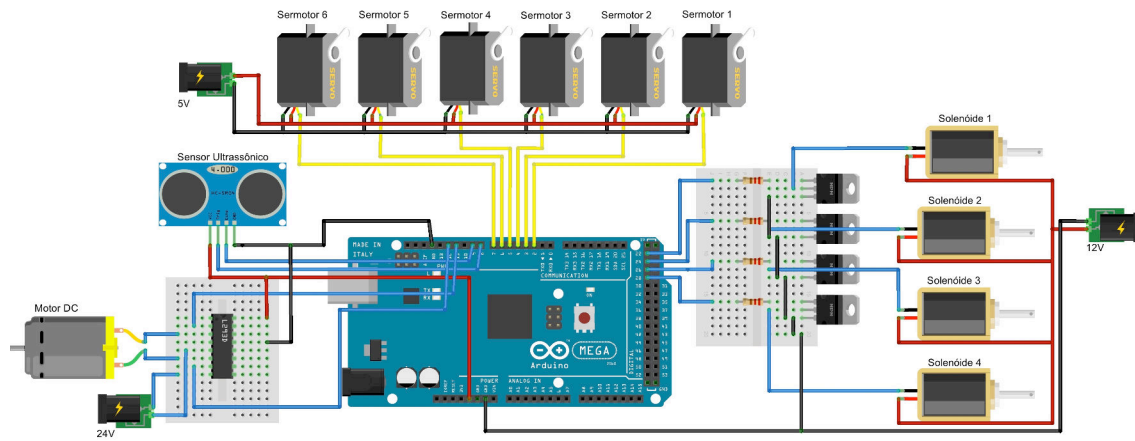


Figura 8. Esquemático de todo protótipo

4. Software de controle

Após a construção de toda parte física do protótipo, foi preciso pensar a sincronização de todos os módulos visando a performance musical. O funcionamento do sistema é exemplificado no Fluxograma representado pela Figura 9.

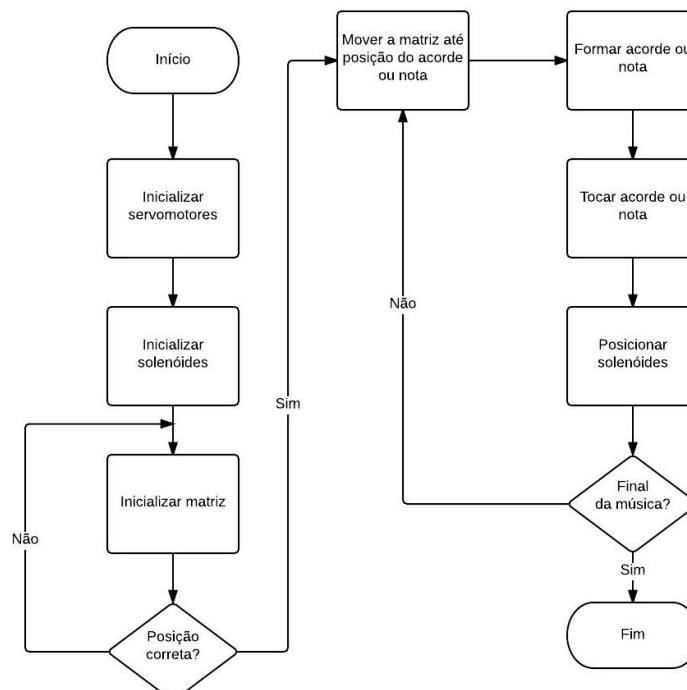


Figura 9. Fluxograma sobre o funcionamento do protótipo

A figura 10 mostra um trecho de código de controle do protótipo.

```

void loop()
{
  andarAte(2); // Move a matriz até a casa dois
  delay(500); // Espera 500 milisegundos
  ativarSolenóide(1,2); // Ativa as solenóides 1 e 2 ao mesmo tempo
  delay(100); // Espera 100 milisegundos
  tocar(3,2); // Toca as cordas 3 e 2 ao mesmo tempo
  delay(500); // Espera 500 milisegundos
  desativarSolenóide(1,2); // Desativa as solenóides 1 e 2 ao mesmo tempo

  andarAte(5); // Move a matriz até a casa cinco
  delay(500); // Espera 500 milisegundos
  ativarSolenóide(3,4); // Ativa as solenóides 3 e 4 ao mesmo tempo
  delay(100); // Espera 100 milisegundos
  tocar(3,4); // Toca as cordas 3 e 4 ao mesmo tempo
  delay(500); // Espera 500 milisegundos
  desativarSolenóide(3,4); // Desativa as solenóides 3 e 4 ao mesmo tempo
}

```

Figura 10. Trecho de código

5. Resultados

Uma demonstração do funcionamento do protótipo robótico projetado para performance musical está disponível no site: <https://youtu.be/dS3c-ZuiV7g>. A Figura 11 mostra o protótipo montado.



Figura 11. Protótipo montado

Ao longo da montagem do protótipo foram enfrentados alguns desafios que serão reportados a seguir.

5.1. Mão direita (MD):

Na mão direita (MD) houve problema no momento em que os servomotores tocam as cordas, como primeira experiência foram usadas palhetas presas com parafusos na haste dos servomotores, assim, ocorreram quatro problemas: o primeiro foi com a fixação da palheta pois, para que a mesma ficasse no sentido de tocar uma corda e em posição para ser fixada no servomotor, foi-se necessário dobra-la ao meio, como o seu material é de

plástico o mesmo não resistiu quando foi usado varias vezes, assim, a dobra quebrava. Uma saída encontrada foi usar uma capa de fio de alimentação (Figura 2). O segundo consistiu na altura das cordas, pois, cada uma atingia alturas diferentes em relação aos servomotores, dependendo da casa em que a mesma era pressionada. Quanto mais próximo ao final braço do violão, mais as cordas se distanciavam das “palhetas” de forma que ao tocar uma nota o som não saia, ou saia abafado. Uma possível solução para esse problema seria implementar um sistema com algum tipo de “elevador”, onde se possa controlar a altura necessária para alcançar as cordas. O terceiro problema foi o ruído característico do movimento do servomotor devido as suas engrenagens, problema esse que pode ser resolvido com a utilização de um captador e um filtro, assim, removendo a perturbação. Por fim, houve problema no controle de força com que as cordas são tocadas, pois no protótipo não há como fazer esse ajuste dinamicamente, visto que o servomotor não tem controle de velocidade e intensidade. Desta forma a dinâmica da música e, conseqüentemente a expressividade, foi prejudicada.

5.2. Mão esquerda (ME):

Na construção do dispositivo que simula a mão esquerda também foram encontrados dificuldades, tais como: dimensão, preço e força dos solenoides, variação no tamanho das casas do violão e o alargamento das cordas à medida que se aproxima da junção do braço. Os solenoides usados eram muito largos, assim, houve uma dificuldade em deixá-los nas posições corretas para a formação de pelo menos um acorde. O preço foi um fator complicador, pois no Brasil não se acha com facilidade solenoides com valores baixos. No projeto foram usados solenoides de baixo custo que tinham pouca força no deslocamento da haste; Para resolver esse problema foi preciso a aplicar uma tensão além do recomendado para obter uma força considerável. Porém, esse excesso de potência gera mais calor, ocasionando um superaquecimento dos solenoides, fazendo com que o sistema não pudesse operar por muito tempo. Outro fator foi a variação no tamanho das casas do violão, já que no seu início elas são mais largas e a medida que se aproxima da região mais aguda, as casas diminuem de tamanho, ilustrado na figura 12, nos pontos ‘c’ e ‘d’. Assim, como a matriz foi feita com madeira e tem formato fixo, não foi possível que se fizesse a propagação de uma mesmo desenho de acorde para outras regiões do violão, pois os solenoides acabavam pressionando locais errados. Da mesma forma, o alargamento da distancia entre as cordas a medida que a matriz se aproxima do fim do violão também ocasionou a má formação de acordes, ilustrado na figura 12, nos pontos ‘a’ e ‘b’. Logo, ao se chegar em certas regiões os acordes não eram formados corretamente.



Figura 12. Ilustração de pontos críticos

Na parte do movimento da matriz, foram observados três problemas: barulho causado pelo motor DC, sensor ultrassônico e a estrutura do suporte de madeira. Os movimentos mecânicos de um motor DC causam ruídos sonoros, este que pode interferir no som do violão, como foi o caso observado no protótipo. O motor utilizado foi retirado juntamente com a estrutura de uma impressora, assim, o projeto teve sons característicos da mesma. No caso do sensor ultrassônico, foi observado que o mesmo retornava valores inconsistentes em determinadas aferições, levando a um erro no posicionamento da matriz, assim, para resolução do problema foi implementado um algoritmo que realizava cinco medidas e a média das mesmas para reduzir o impacto de *outliers*. A etapa mais relevante dessa parte foi a construção da estrutura fixada ao violão, visto que, a mesma não poderia danificar o instrumento com pregos ou parafusos, assim, foi construída uma estrutura que se encaixava no seu braço, porém, a mesma acabava saindo da sua posição original caso ele fosse movimentado.

5.3. Tempo

O estratégia utilizada para controle do tempo da performance musical foi o atraso sucessivo dos eventos musicais, ou seja, não há utiliza-se a referencia de tempo inicial mas o tempo decorrido da ultimo evento (Figura 10). No futuro, isso pode gerar um problema, visto que objetiva-se a criação de outros robôs musicais que possam tocar juntos. Desta forma, o acumulo de atrasos pode causar problemas de sincronização entre os instrumentos. Uma possível solução implica em utilizar janelas de sincronização para que de tempos em tempos, todo o sistema novamente se sincronizasse emulando a capacidade humana de ouvir e predizer aspectos rítmicos, como no ato de bater palmas.

6. Conclusão

O presente artigo apresentou um dispositivo robótico para executar performances musicais em violão acústico. Uma demonstração do protótipo pode ser visualizada em <https://youtu.be/dS3c-ZuiV7g>.

O robô é composto de 3 partes que se comunicam: dispositivo deslizante de mão esquerda, dispositivo de deflexão de corda de mão esquerda, dispositivo de excitação de cordas de mão direita. O Arduino Mega 2560 é responsável pela sincronização do Hardware entre as 3 partes do mecanismo robótico. Foi desenvolvido um algoritmo de sincronização de todos os módulos visando a performance musical.

Dentre as limitações musicais cita-se: restritos desenhos de acordes possíveis, impossibilidade de controle dinâmico da força dos atuadores de mão direita (amplitude das notas), possível má formação de acordes e sua qualidade sonora devido características de construção do violão acústico, controle de tempo inapropriado para execução em conjunto, ruído sonoro oriundo dos motores e outros componentes eletromecânicos. As limitações técnicas perpassam por: tamanho dos solenoides, força aplicável dos solenoides, controle de velocidade dos servomotores, redimensionamento automático da matriz de solenoides (efeito sanfona), programação musical estática.

Os trabalhos futuros implicam em buscar solução para as limitações supracitadas, além da construção de novos instrumentos visando um festival de música robótica. Uma linguagem de programação específica para o controle dos robôs está em desenvolvimento.

7. Referências

- Alimisis, D., Moro, M., Arlegui, J., Pina, A., Frangou, S., & Papanikolaou, K. (2007, August). "Robotics & constructivism in education: The TERECoP project. In EuroLogo (Vol. 40, pp. 19-24)".
- Berdahl, E., Salazar, S., & Borins, M. (2013). "Embedded networking and hardware-accelerated graphics with satellite ccrma". In Proceedings of the International Conference on New Interfaces for Musical Expression (pp. 325-330).
- Costalonga, L. (2009). "Biomechanical Modeling of Musical Performace: A Case Study of the Guitar. PhD thesis, School of Computing, Communications and Electronics, University of Plymouth, 2009.
- Costalonga, L. ; Neves, M. V. M.(2013). Impacto Regional do SBCM: Caso de estudo em Vitória-ES. In: Simpósio Brasileiro de Computação Musical, 2013, Brasília. Anais do Simpósio Brasileiro de Computação Musical, 2013. v. 1
- de Souza, A. R., Paixao, A. C., Uzêda, D. D., Dias, M. A., Duarte, S., & de Amorim, H. S. (2011). "A placa Arduino: uma opção de baixo custo para experiências de física assistidas pelo PC". Revista Brasileira de Ensino de Física, 33.
- Hiller, L., & Beauchamp, J. (1965). "Research in music with electronics". Science,150(3693), 161-169.
- Kapur, A., Eigenfeldt, A., Bahn, C., & Schloss, W. A. (2009). "Collaborative composition for musical robots. Journal of Science and Technology of the Arts",1(1), 48-52.
- Kitano, H., Asada, M., Kuniyoshi, Y., Noda, I., & Osawa, E. (1997, February). "Robocup: The robot world cup initiative. In Proceedings of the first international conference on Autonomous agents (pp. 340-347)". ACM.
- Lund, H. H., & Ottesen, M. (2008). "RoboMusic: a behavior-based approach.Artificial Life and Robotics", 12(1-2), 18-23.
- Miranda, E. R., & Wanderley, M. M. (2006). "New digital musical instruments: control and interaction beyond the keyboard (Vol. 21)". AR Editions, Inc..
- Reboursière, L., Lähdeoja, O., Drugman, T., Dupont, S., Picard-Limpens, C., & Riche, N. (2012, May). "Left and right-hand guitar playing techniques detection". In Proc. of NIME.
- Singer, E., Feddersen, J., Redmon, C., & Bowen, B. (2004, June). "LEMUR's musical robots". In Proceedings of the 2004 conference on New interfaces for musical expression (pp. 181-184). National University of Singapore.

1 Disponível em: <<https://www.arduino.cc/en/Reference/Servo>>. Acesso em 6 jun. 2015

2 Disponível em: <<https://www.arduino.cc/en/Reference/Delay>>. Acesso em 6 jun. 2015

3 Disponível em: <<http://playground.arduino.cc/Main/UltrasonicSensor>>. Acesso em 15 jun. 2015

4 Disponível em: <<https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardMega2560>>. Acesso em 1 set. 2015