

Segundo Relatório de Iniciação Científica

Automação da Aquisição de Dados de Impedância em Sensores e Biossensores

Instituto de Física de São Carlos (IFSC) – Grupo de Polímeros Bernhard Gross

Lorenzo Antonio Buscaglia

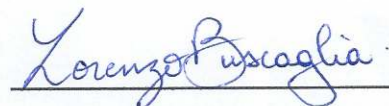
Orientador:

Osvaldo Novais de Oliveira Jr.

Colaborador:

Felippe José Pavinatto

FAPESP processo 2015/16604-8



Lorenzo A. Buscaglia



Osvaldo Novais de Oliveira Jr.

Resumo

Para desenvolver um sistema de automação da aquisição de dados de espectroscopia de impedância, inicialmente planejaram-se os componentes e softwares que farão parte do sistema final, como referência para os sistemas protótipo. Montou-se, com circuitos integrados (CIs) simples, um protótipo da placa de multiplexação analógica, controlada por um microcontrolador programável. Fizeram-se análises detalhadas do ruído e a impedância adicionados pelo protótipo, montando curvas de calibração. Empregando-se relés, montou-se um dispositivo semelhante para aplicação em medidas de espectroscopia de impedância eletroquímica. Este foi integrado em uma caixa plástica para facilitar conexões e melhorar a estética. Já visando a um dispositivo final para aplicação em medidas sobre pele, fabricou-se uma placa de multiplexação analógica que utilizará CIs de alta tecnologia e também desenhou-se uma placa provisória até dominar um método de soldagem para a primeira. Fabricou-se uma placa de LEDs e um sensor que serão utilizados após a fabricação e montagem da placa provisória.

I. Introdução

A impedância é uma grandeza complexa [1] que se descreve a partir de dois parâmetros, que podem ser módulo e fase, resistência e reatância, etc. Da espectroscopia de impedância, obtém-se portanto um gráfico de cada parâmetro como função das frequências da tensão aplicada. Quaisquer parâmetros utilizados são funções de outro parâmetro. Por exemplo, relacionando módulo (Z) e fase (θ) com resistência (R) e reatância (X), tem-se: $R(Z) = |Z|\cos(\theta)$, $X(Z) = |Z|\sin(\theta)$. A espectroscopia é útil para sensoriamento, pois as propriedades elétricas de um material ou de um ambiente podem se alterar quando se detecta o que se chama de analito.

Um sensor baseado em medida de impedância é, assim, um dispositivo que mede alterações nos eletrodos de contato na presença de um analito. Os sensores mais simples fazem contato metálico direto entre o analito e os eletrodos, que têm formatos diversos. Por exemplo, em sensores para análise de gotas, utilizam-se dois eletrodos interdigitados impressos sobre plástico [2]. Línguas eletrônicas [3] utilizam um arranjo destes para medir sabores. Outro exemplo é o multi-sensor para detecção de escaras [4], com numerosos eletrodos circulares igualmente espaçados para "mapear" a impedância da pele. Os diferentes formatos estão na figura 1.



Figura 1: à esquerda um sensor para medição de gotas <http://www.mdpi.com/1424-8220/15/6/13201/htm> , no centro uma língua eletrônica http://www.cnpdia.embrapa.br/noticia_31102006.html , e à direita um sensor para medição sobre pele [4].

Em alguns casos, a modificação química dos eletrodos aumenta a sensibilidade do sensor. Por exemplo, biossensores [5] possuem um filme de enzimas depositado ("camada ativa") que interage especificamente com o componente do analito que se deseja detectar. Com isto, ao variar a concentração desse componente surgem maiores diferenças entre os espectros de impedância, facilitando a detecção [5]. Um diagrama simplificado de um biossensor encontra-se na figura 2.

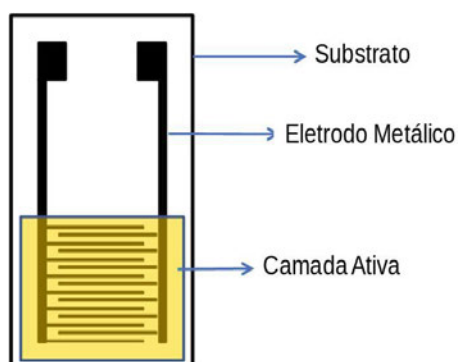


Figura 2: Diagrama simplificado de um biossensor.

A espectroscopia de impedância é útil para classificar analitos dentro de grupos de referência. Na língua eletrônica, cada grupo corresponde a um sabor ("doce", "salgado", "amargo", etc). No multi-sensor para detecção de escaras, a um estado da pele ("saúdável" ou "danificada"). Para criar os grupos de referência, são feitas numerosas medidas sobre analitos conhecidos, seguidas de uma análise estatística dos resultados em procura de correlações [4,6,7]. As correlações ocorrem em determinada/s frequência/s e permite/m que o espectro não seja mais necessário. Ou seja, pode-se medir somente nessa/s frequência/s para classificar o analito, abreviando a medição.

No processo citado, a automação de medições múltiplas é de grande utilidade. Com essa motivação, durante este projeto desenvolveram-se dispositivos automatizados de multiplexação analógica aplicáveis a espectroscopia de impedância. Foram construídos protótipos e dispositivos funcionais com o objetivo de efetuar mapeamentos de impedância sobre pele, visto que, uma vez dominada essa técnica, pode-se adaptar o sistema para um arranjo de sensores sem disposições espaciais relevantes.

II. Objetivos

O objetivo geral deste projeto é desenvolver um sistema de automação da aquisição de dados de espectroscopia de impedância para sensores e biossensores, com foco em medidas sobre pele. Dividiu-se o objetivo nas seguintes partes:

II.1) Planejamento do sistema final

II.1.a) Definir componentes a serem utilizados.

II.1.b) Escolher software a ser utilizado.

II.2) Prototipação

II.2.a) Projetar e montar protótipo da placa de multiplexação analógica.

II.2.b) Escolher e aplicar método de controle do protótipo.

II.2.c) Avaliar o funcionamento do controle do protótipo.

II.3) Caracterização do protótipo

II.3.a) Medir ruído adicionado pelo sistema protótipo.

II.3.b) Medir impedância adicionada pelo sistema protótipo.

II.4) Dispositivo simples

II.4.a) Projetar e montar um dispositivo simples com multiplexação analógica.

II.4.b) Avaliar o funcionamento do mesmo.

II.5) Dispositivo final

II.5.a) Desenhar e fabricar placa de multiplexação analógica.

II.5.b) Avaliar o funcionamento da placa.

II.5.c) Estabelecer um método de conexão com o multi-sensor.

II.6) Caracterização do dispositivo final

II.6.a) Medir ruído e impedância adicionados pelo dispositivo final.

II.6.b) Realizar medidas sobre pele para comprovar o funcionamento.

III. Materiais, Metodologia e Resultados

III.1) Planejamento do sistema final

Escolheram-se os componentes e softwares que farão parte do sistema final de multiplexação analógica para aplicação em espectroscopia de impedância, como referência para o desenvolvimento de sistemas protótipo.

III.1.a) Escolha dos componentes

III.1.a.i) Solartron 1260: Gerador e analisador de estímulos elétricos.

III.1.a.ii) Baseando-se no multi-sensor rígido disponível em laboratório, mostrado na figura 3, será fabricado um novo multi-sensor com conexões de mais fácil acesso.

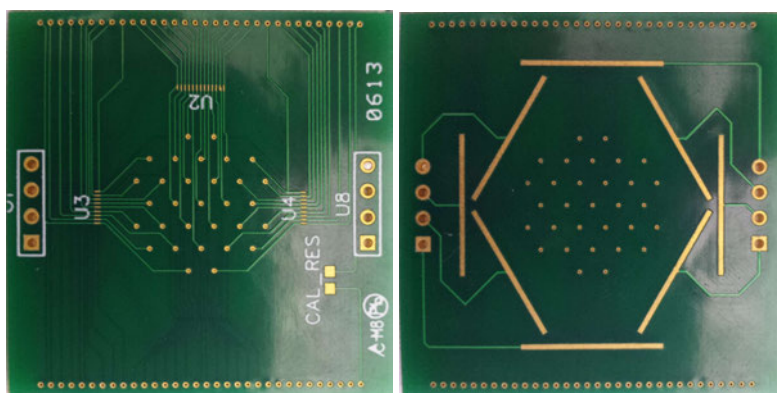


Figura 3: Multi-sensor disponível no laboratório para medição de impedância sobre pele.

III.1.a.iii) Baseando-se na placa de multiplexação analógica disponível no laboratório, mostrada na figura 4, será fabricada nova placa com conexões correspondentes às do sensor fabricado.

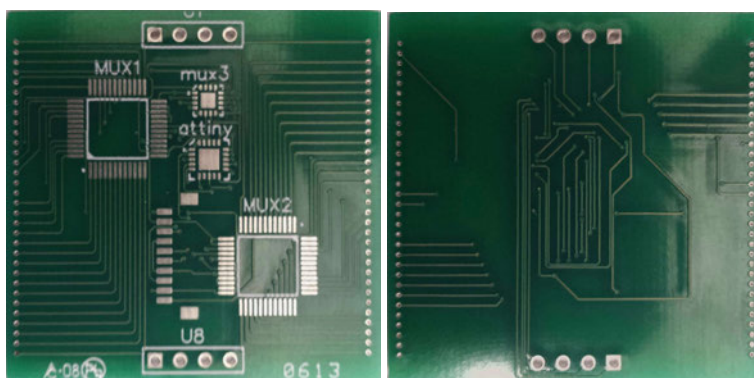


Figura 4: Placa de multiplexação analógica desenhada para utilização em conjunto com sensor da figura 3.

III.1.a.iv) Placa controladora programável Arduino Uno, que irá controlar a do item anterior.

III.1.b) Softwares Arduino IDE (em C++), para programação da placa controladora, e LabVIEW, para programação do medidor.

III.2) Prototipação

III.2.a) Montagem da placa protótipo de multiplexação analógica.

Foram utilizados 8 multiplexadores analógicos 4051 de 8 vias e um decodificador 2-4 duplo 74HCT139. Montou-se o circuito em uma *protoboard* com entradas de controle idênticas às da placa planejada para o dispositivo final.

III.2.b) Método de controle do sistema

Conectou-se a placa controladora Arduino UNO com as entradas da placa protótipo, controlando-a e subministrando alimentação para os C.I.s. A programação foi feita com códigos em linguagem C++.

III.2.c) Avaliação do funcionamento do sistema

Conectou-se um LED em cada saída da placa protótipo e se executou o código do anexo 1, capaz de acender qualquer par de LEDs, como pode ser visto na figura 5.

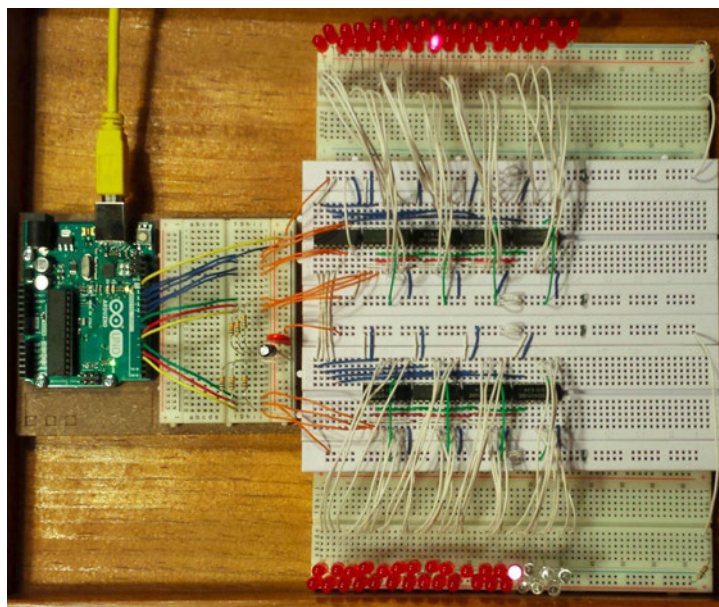



Figura 5: Sistema protótipo acendendo os LEDs 18 e 7.

III.3) Caracterização do protótipo

Ajustou-se os valores de R_1 , R_2 e C em um circuito de formato  para que o espectro de impedância fosse semelhante ao da pele [4]. Usando as fórmulas $|Z| = \sqrt{[R_1 + \frac{R_2}{1+(\omega CR_2)^2}]^2 + [\frac{\omega CR_2^2}{1+(\omega CR_2)^2}]^2}$ & $\theta = \arctan(\frac{-\omega CR_2^2}{R_1[1+(\omega CR_2)^2] + R_2})$, onde $\omega = 2\pi f$, obteve-se $R_1 = 5,7k\Omega$, $R_2 = 150k\Omega$ e $C = 15nF$. Graficaram-se ambos espectros, mostrado na figura 6, que foram semelhantes às curvas "Day 3, Damage" [4] medidas em pele de ratos, presentes na mesma figura.

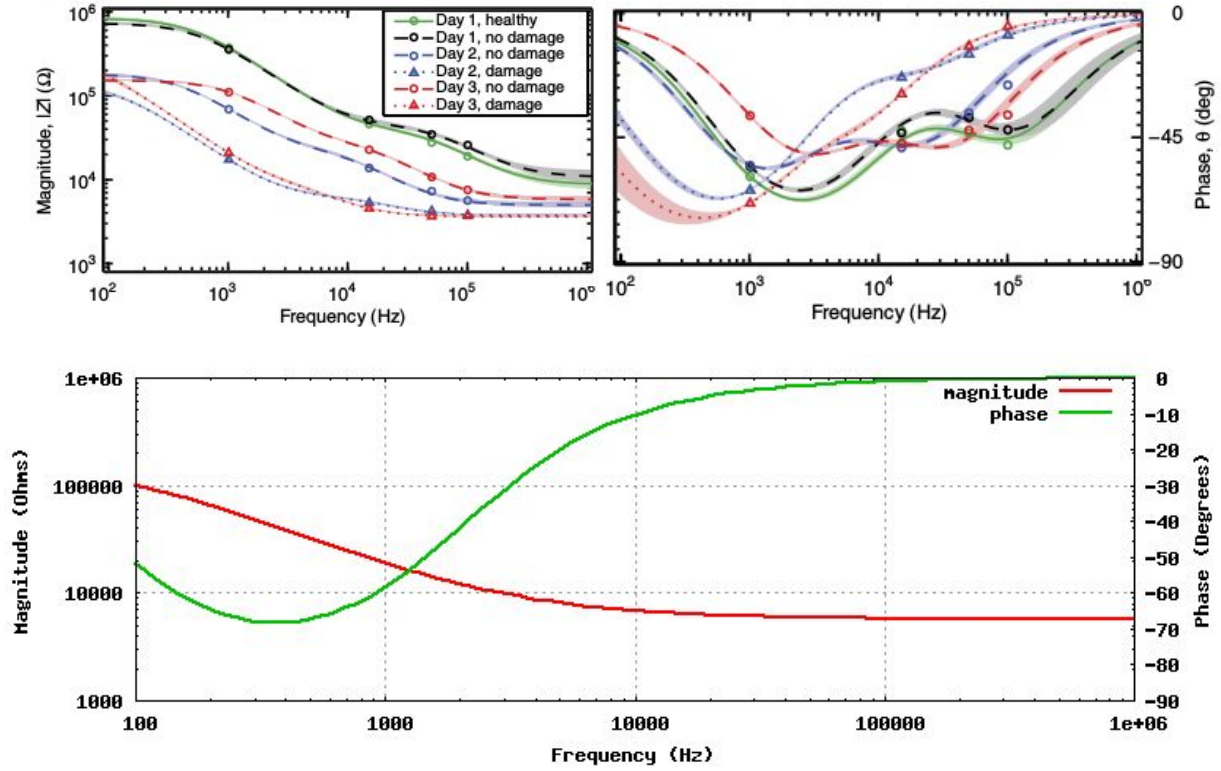


Figura 6: Em cima, os espectros de impedância de pele de ratos [4]. Embaixo, os espectros teóricos do circuito equivalente encontrado.

Conectou-se o circuito equivalente entre duas saídas da placa de multiplexação analógica, fixadas pelo código do anexo 1, para poder avaliar ruído e impedância adicionados pelo protótipo.

III.3.a) Análise de ruído

Na configuração acima, foram feitas N=20 medidas entre 1kHz e 100kHz (frequências limpas) [8] e obteve-se os espectros superpostos da figura 7.

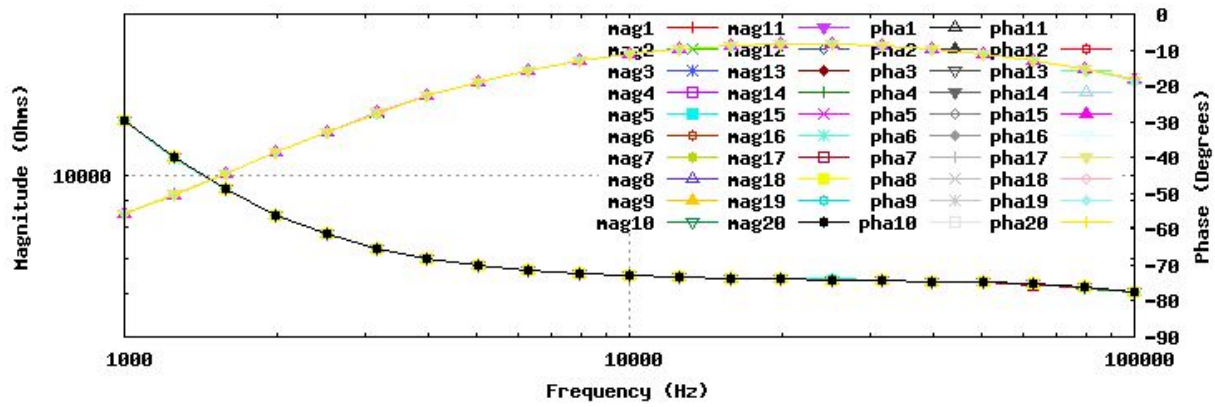


Figura 7: Espectros de módulo e fase das 20 medições feitas através da placa protótipo.

Calculou-se o desvio padrão da resistência R e da reatância X em cada frequência, segundo a fórmula

$$std(y) = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}, \text{ onde } \bar{y} = mean(y) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i \text{ e } y_i = y(x_i). \text{ O resultado, mostrado na figura 8, indicou desvio}$$

padrão relativo $relstd(y) = \frac{1}{\bar{y}} std(y)$ para ambos parâmetros inferior a 0,4%, sendo útil para espectroscopia de impedância.

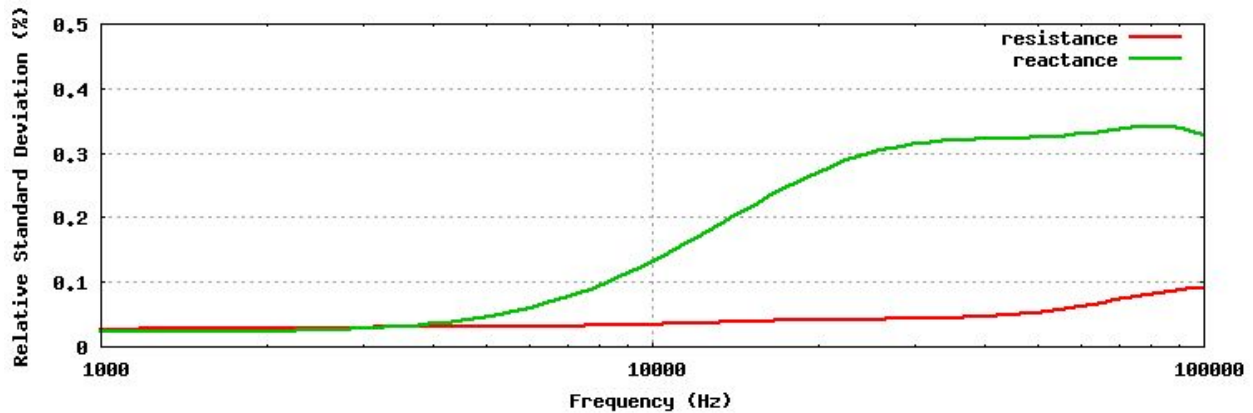


Figura 8: Desvio padrão relativo da resistência e a reatância como funções da frequência.

III.3.b) Análise de impedância adicionada

Mediu-se o espectro real de impedância (Z_{real}) do circuito equivalente, mostrado na figura 9.

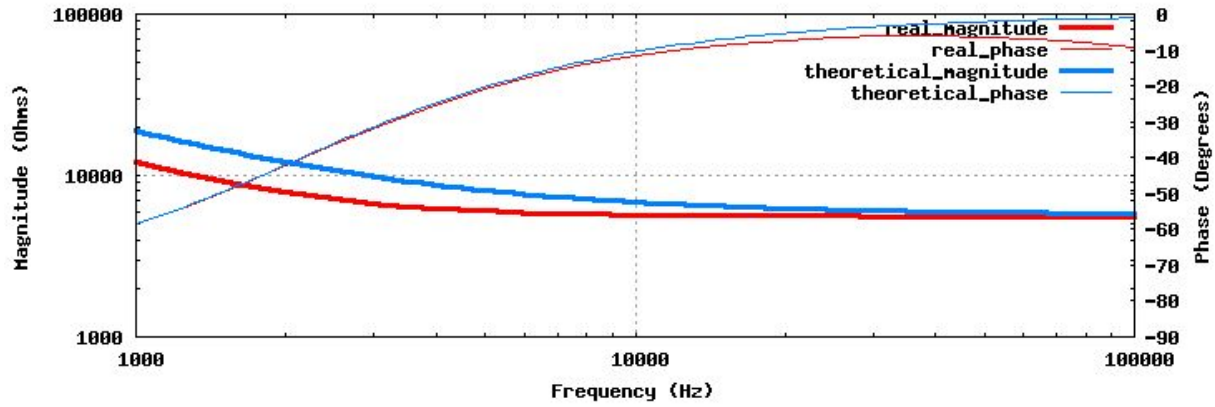


Figura 9: Impedância real do circuito equivalente em contraste com a teórica calculada.

Obteve-se a impedância adicionada pelo sistema protótipo $Z_{add}(f_i) = \bar{Z}(f_i) - Z_{real}(f_i)$, onde $\bar{Z}(f_i) = \bar{R}(f_i) + j\bar{X}(f_i)$, mostrada na figura 10. As curvas servem para calibração em medidas posteriores.

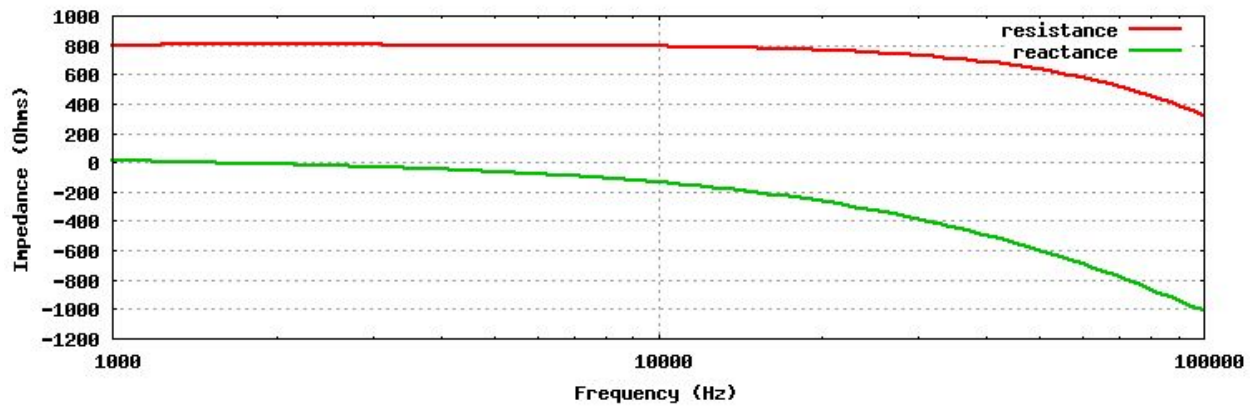


Figura 10: resistência e reatância adicionadas pelo protótipo como funções da frequência (curvas de calibração).

III.4) Dispositivo simples

Com uma placa industrial de 16 relés com optoacoplador para Arduino e uma placa controladora Arduino Mega, desenvolveu-se um dispositivo de 8 canais para aplicação em espectroscopia de impedância, inclusive por eletroquímica.

III.4.a) Montagem do dispositivo simples

Dividiram-se os relés em dois grupos de 8 e se juntaram as entradas de cada grupo a uma entrada comum na parte traseira do dispositivo, para conectar os "inputs" do medidor. Disponibilizou-se a saída de cada relé na frente do dispositivo, para conectar os sensores. Também foram disponibilizadas 8 conexões adicionais na frente do dispositivo, que se juntam em uma única conexão na parte traseira, para medições com três "inputs". Utilizando um cabo "flat" com conectores "latch" conectaram-se 20 saídas da placa de controle Arduino Mega às 20 entradas da placa de relés,

permitindo controlar o sistema. O circuito foi colocado em uma caixa plástica, mostrado na figura 11, para dar rigidez e estética.

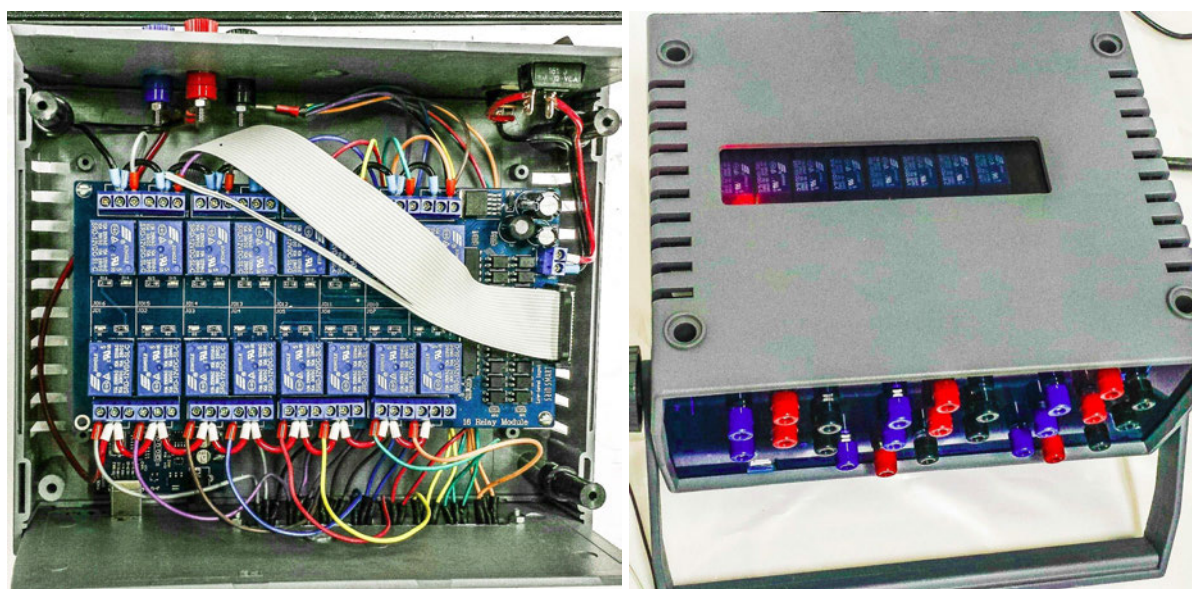


Figura 11: Dispositivo simples de multiplexação analógica utilizando relés.

III.4.b) Avaliação do funcionamento do dispositivo simples

Foram conectados sensores no dispositivo para avaliar seu funcionamento. A conexão dos relés é feita por contato de placas metálicas, o que adiciona uma impedância desprezível. O ruído adicionado pelo sistema numa medição em sensores pode ser visto na figura 12, onde se contrasta uma medição com e sem o dispositivo multiplexador. O formato senoidal do ruído indica sua proveniência na rede elétrica e também pode ser desprezado fazendo tratamento dos resultados.

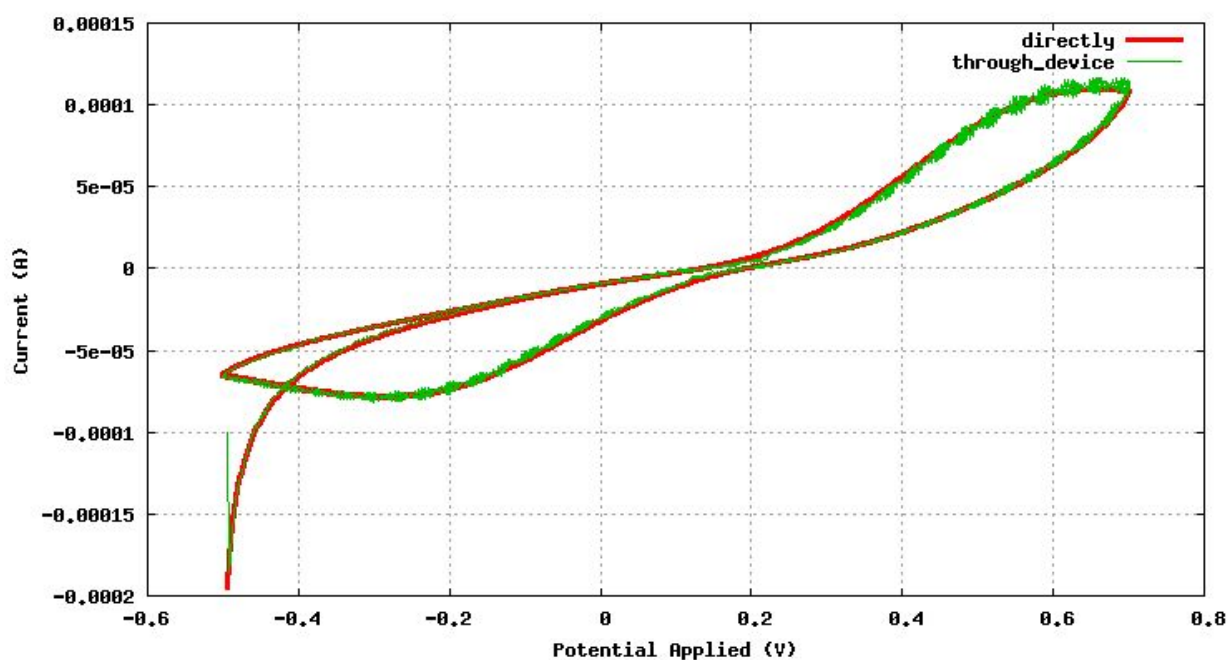


Figura 12: uma medida direta e uma através do dispositivo multiplexador.

III.5) Dispositivo final

III.5.a) Desenho e fabricação da placa de multiplexação analógica

Com o software Eagle, desenhou-se a placa com os "footprints" dos multiplexadores analógicos ADG732BCPZ, os pinos de conexão e as trilhas, como se vê à esquerda da figura 13. A empresa Mazza G-TEC fabricou a placa à direita da figura 13. Foram soldados todos os componentes da placa para avaliar seu funcionamento.

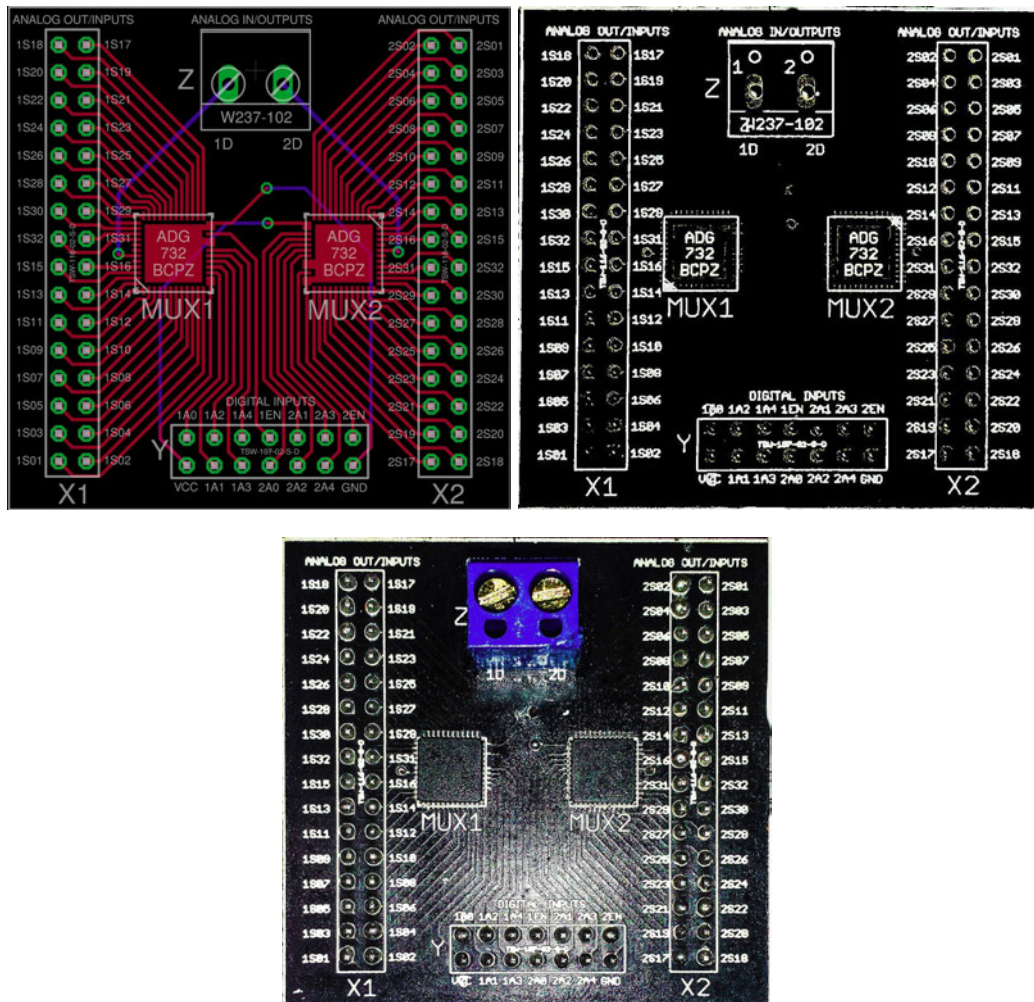


Figura 13: Em cima à esquerda, o desenho em Eagle da placa de multiplexação analógica. À direita, a placa fabricada. Embaixo, a placa montada.

III.5.b) Avaliação do funcionamento da placa

Com base no multi-sensor da figura 3, foi desenhada uma placa com um LED entre cada par de eletrodos vizinhos (aumentando a distância entre eles), como se vê à esquerda da figura 14. A placa foi então fabricada e montada utilizando solda manual (direita e parte inferior da figura 14, respectivamente).

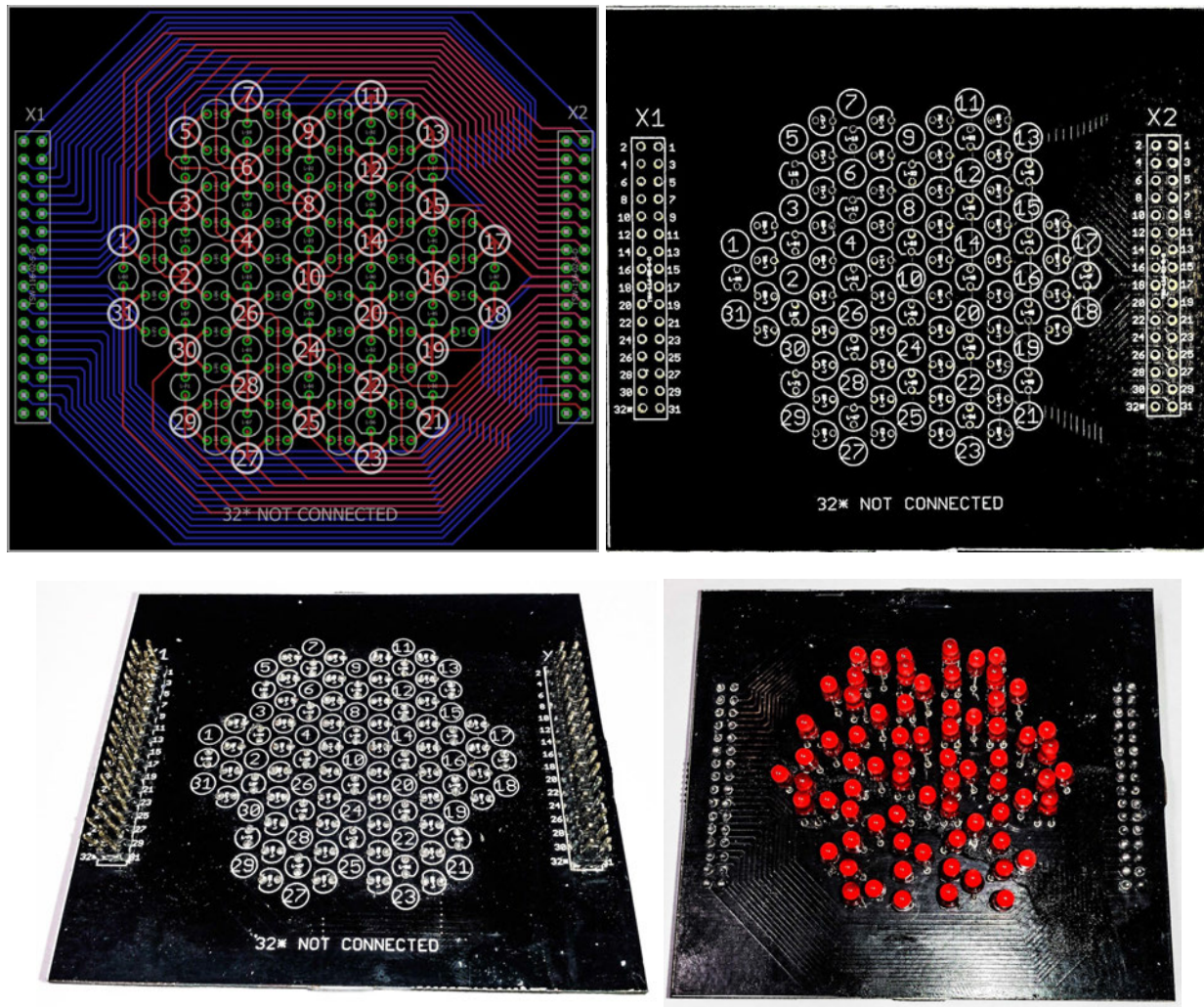


Figura 14: Em cima à esquerda, o desenho em Eagle da placa auxiliar para testes. À direita, a placa fabricada. Embaixo, frente (esquerda) e verso (direita) da placa montada (devido a uma falha no desenho, os LEDs tiveram que ser colocados no verso da placa).

A avaliação do funcionamento da placa de multiplexação analógica, disponível no anexo 2, indicou erros no processo de solda da mesma, impossibilitando a utilização do sensor citado na seguinte seção (III.5.c). Por isso, optou-se por desenhar uma placa provisória mais "robusta" com quatro multiplexadores analógicos 4067 de 16 vias, que requerem uma solda mais simples. O desenho encontra-se na figura 16, o qual ainda será encaminhado para fabricação.

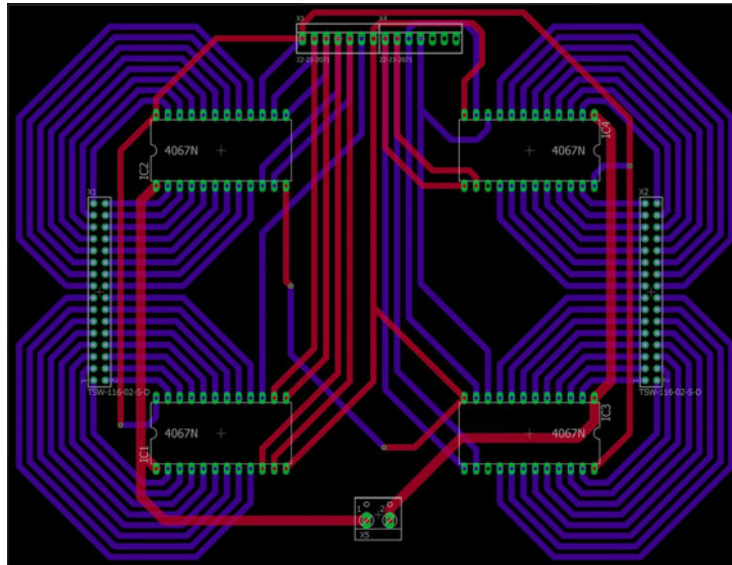


Figura 16: Desenho da placa de multiplexação analógica provisória, utilizando multiplexadores 4067.

III.5.c) Multi-sensor

Fabricou-se o multi-sensor da figura 17, copiando o disponível no laboratório mas com conexões idênticas às da placa de multiplexação analógica. Esse tipo de conexão resultou prático e eficiente.

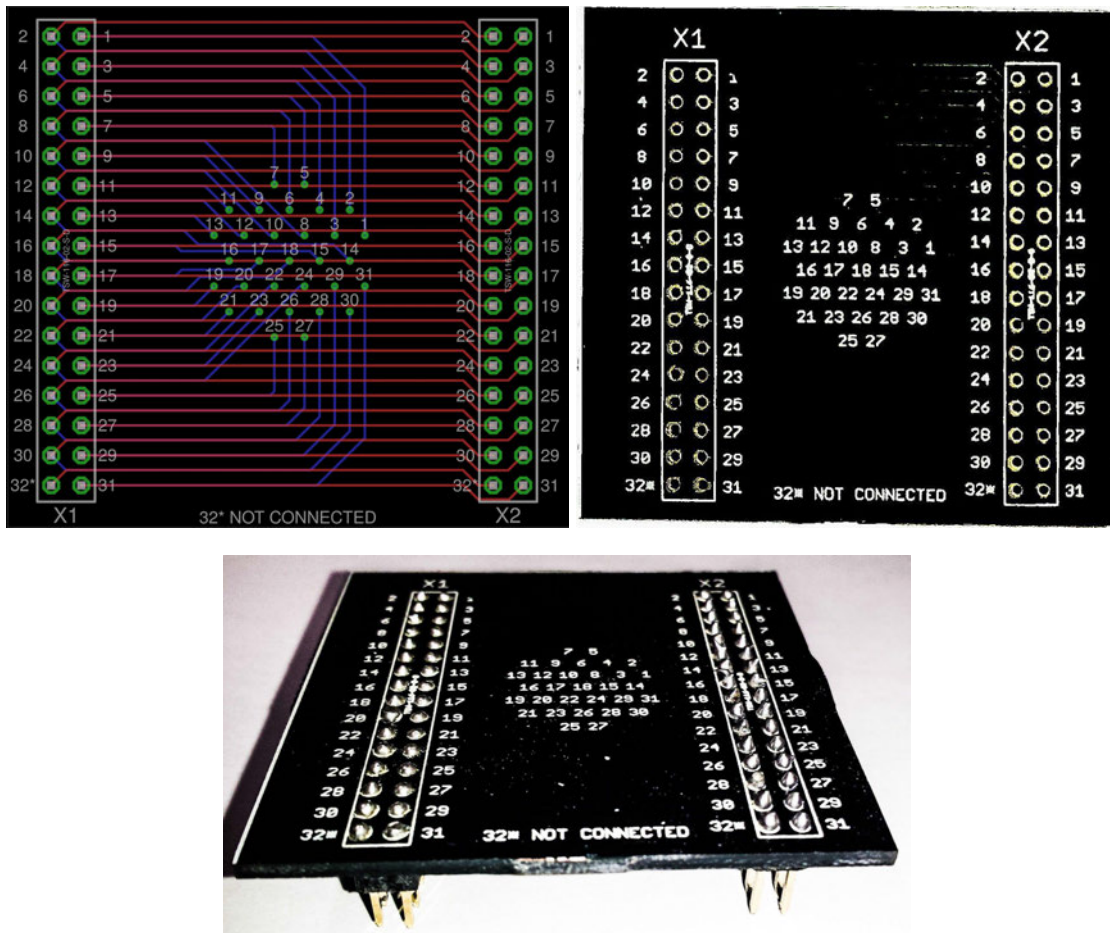


Figura 17: Em cima à esquerda, o desenho em Eagle do novo multi-sensor. À direita, o multi-sensor fabricado. Embaixo, montado.

IV. Conclusões

Como referência para o desenvolvimento de sistemas protótipo, inicialmente planejaram-se todos os componentes e softwares que farão parte do sistema final para aplicação em espectroscopia de impedância sobre pele. A seguir, montou-se um protótipo básico da placa de multiplexação analógica com circuitos integrados simples, utilizando uma *protoboard*, com funcionamento semelhante ao do sistema final. O controle foi feito com uma placa controladora programável e se constatou o funcionamento correto da placa protótipo. Análises detalhadas indicaram que o ruído adicionado pelo sistema é desprezível. A impedância adicionada pelo sistema foi medida e foram geradas curvas de calibração para medidas posteriores.

Aplicando os conhecimentos adquiridos na primeira parte, foi montado um dispositivo de multiplexação analógica mais simples para aplicação em espectroscopia de impedância, inclusive por eletroquímica. O dispositivo usa relés e uma placa controladora e foi integrado em uma caixa plástica para facilitar suas conexões e melhorar sua estética. Apesar de ter mostrado influência das oscilações da rede elétrica, o funcionamento do sistema foi satisfatório e fizeram-se medidas em vários sensores, já em situação de sensoriamento real.

Visando a um dispositivo final para aplicação em medidas sobre pele, fabricou-se uma placa de multiplexação analógica que utilizará circuitos integrados de tecnologia superior aos do protótipo. Também fabricou-se uma placa de LEDs para testes de funcionamento e um novo sensor. No entanto, devido a problemas na soldagem da placa de multiplexação analógica, o funcionamento do sistema final não foi satisfatório. Foi desenhada uma nova placa de multiplexação analógica, utilizando circuitos integrados de soldagem mais rudimentar, que será encaminhada para fabricação. Com isto, foram atingidos os objetivos das seções II.1 até II.5. Os objetivos da seção II.6 somente poderão ser atingidos após a fabricação e o teste da nova placa de multiplexação analógica.

Objetivos futuros:

- i) Atingir os objetivos da seção II.6, após a fabricação da nova placa de multiplexação analógica.
- ii) Para eliminar a influência da rede elétrica no dispositivo de medição desenvolvido na seção III.4, serão analisadas duas opções: o aperfeiçoamento do método de filtro utilizado na fonte de alimentação e uso de uma bateria interna.
- iii) Para utilizar a nova placa de multiplexação analógica em um sistema final, também serão feitos aperfeiçoamentos no sensor e na placa de testes que darão robustez ao conjunto.
- iv) A linguagem de programação em todas as partes deste projeto foi C++, que não tem interface gráfica favorável para uso em laboratório. Por conseguinte, serão desenvolvidos programas equivalentes em LabVIEW que terão a interface gráfica desejada.

Observação:

Visando, a posteriori, a utilização de circuitos integrados de alta tecnologia, tanto para multiplexação analógica quanto como geradores e analisadores de sinal, é importante para o laboratório dominar técnicas avançadas de soldagem. Também visando um dispositivo final flexível, as técnicas deverão ser adaptadas para solda sobre polímeros (Como PET, por exemplo).

V. Plano de Trabalho e Cronograma para as Etapas Seguintes

O trabalho continuará com uma etapa de fabricação de novas placas de multiplexação analógica, incluindo a soldagem dos seus componentes. Aplicando a programação de controle aprendida, o candidato avaliará o funcionamento das novas placas, encontrando eventuais erros de desenho e as aperfeiçoando. O candidato fará análises de ruído e impedância adicionados pelas mesmas, avaliando sua aplicabilidade em espectroscopia de impedância, porém já respaldado por resultados do primeiro período deste projeto. Paralelamente será feito o aperfeiçoamento dos sensores e placas de teste desenhadas no primeiro período, visando um equilíbrio entre robustez e tamanho das mesmas.

Na etapa seguinte será conectado o sistema completo (placa de controle, placa de multiplexação analógica, sensor e medidor de impedância). O candidato inicialmente controlará cada parte do sistema separadamente (utilizando diferentes softwares) para fazer medidas de impedância sobre pele ou outros analitos. Os resultados das medidas deverão ser analisados para gerar mapas de impedância da região, por exemplo.

A seguir, o candidato irá integrar o controle de todo o sistema em um único software. Atualmente a sincronização do dispositivo multiplexador e o medidor se faz a partir de cronômetros. Já com isto, será possível controlar simultaneamente o medidor de impedância e a placa de controle, sem necessidade de medição de tempos. O candidato poderá escolher um software favorável para a utilização em laboratório, substituindo a linguagem em códigos por um programa com uma interface gráfica apropriada. Os programas desenvolvidos serão aperfeiçoados até cumprir as funções requeridas pelos usuários do laboratório. Finalizando, o programa poderá ser aplicado a outros dispositivos.

Durante o andamento das etapas anteriores, o candidato poderá também procurar alternativas de soldagem que possibilitem a utilização de circuitos integrados (CIs) de tecnologia mais avançada, que irão reduzir tamanho e peso das placas.

O cronograma das etapas a serem realizadas pelo candidato ao longo do ano estão representadas na tabela 1:

Tabela 1: Cronograma de atividades do candidato durante o ano.

Mês Etapa	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1												
2												
3												
4												
5												
6												
7												
8												
9												
10												
11												
12												

Etapas:

- 1 - Fabricação de novas placas de multiplexação analógica.
- 2 - Avaliação do funcionamento das novas placas.
- 3 - Aperfeiçoamento do desenho das placas.
- 4 - Análise de ruído e impedância adicionados (curvas de calibração).
- 5 - Conexão do sistema completo (controle por blocos).
- 6 - Medidas semi-automatizadas (análise básica de resultados).
- 7 - Integração do software do sistema.
- 8 - Medidas automatizadas.
- 9 - Desenvolvimento da interface gráfica apropriada.
- 10 - Aplicação do novo software a outros dispositivos.
- 11 - Aperfeiçoamento de sensores e placas de teste.
- 12 - Procura de alternativas para utilizar CIs de tecnologia mais avançada.

VI. Estágio no Exterior

O candidato tem interesse em solicitar no curso de seu estágio de iniciação científica uma Bolsa Estágio de Pesquisa no Exterior (BEPE) para visitar o laboratório da professora Ana Claudia Arias, na Universidade da Califórnia em Berkeley (USA), pelo período de 1 ou 2 meses durante as férias escolares. A professora do exterior já foi consultada e está em pleno acordo com esse estágio. No período no exterior, o aluno poderá receber instruções práticas de estudantes da Escola de Engenharia de Berkeley, os quais tem experiência na fabricação de dispositivos de controle

de aquisição de dados de impedância, semelhantes ao proposto neste plano de pesquisa [14]. Vale salientar que o grupo da professora Ana Arias é uma referência mundial na área de Eletrônica Impressa e Flexível, e que o mesmo possui uma colaboração ativa com o Dr. Felipe J. Pavinatto (colaborador deste projeto) na área de Biossensores Impressos e Flexíveis.

VII. Referências

- [1] Chinaglia, D. et al. Espectroscopia de impedância no laboratório de ensino. *Revista Brasileira de Ensino de Física*. 30:4504.1-4504.9, 2008. doi:10.1590/S1806-11172008000400013
- [2] Soares, A. et al. Controlled Film Architectures to Detect a Biomarker for Pancreatic Cancer Using Impedance Spectroscopy. *ACS Appl Mater Interfaces*. 7:25930-7, 2015. doi:10.1021/acsami.5b08666
- [3] *Electronic Noses and Tongues in Food Science*. Editora Mendez, M. Elsevier, London, 2016.
- [4] Swisher, S. et al. Impedance sensing device enables early detection of pressure ulcers in vivo. *Nature Communications*. 6:6575, 2015. doi:10.1038/ncomms7575
- [5] *Electrochemical Sensors in Bioanalysis*. Editores Stefan, R.L. et al. Marcel Dekker, New York, 2001.
- [6] Oliveira Jr., O. et al. Information Visualization to Enhance Sensitivity and Selectivity in Biosensing. *Biointerphases*. 7:1-15, 2012. doi:10.1007/s13758-012-0053-7
- [7] Rodrigues Jr., J. et al. On the convergence of nanotechnology and Big Data analysis for computer-aided diagnosis. *Nanomedicine (Lond)*. 11:959-82, 2016. doi:10.2217/nmm.16.35.
- [8] *Principles of Instrumental Analysis*. Skoog, D. College Saunders, Philadelphia, 1980.

VIII. Anexos

VIII.1) Anexo 1: Código em C++ executado pela placa Arduino Uno, no sistema protótipo, na seção III.2.c.

```
int U[11] = {3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13}, A_1[2]={11,9}, A_0[2]={12,10}, C[2]={6,3}, B[2]={7,4}, A[2]={8,5}, VCC=13;
void setup() { for( int i = 0; i < 11; i++ ) pinMode( U[i], OUTPUT ); }
void connect_LED( int side, int LED ) {
if      (LED<=7)      { digitalWrite(A_1[side],LOW); digitalWrite( A_0[side], LOW ); }
else if (LED<=15)    { digitalWrite(A_1[side],LOW); digitalWrite( A_0[side], HIGH ); }
else if (LED<=23)    { digitalWrite(A_1[side],HIGH); digitalWrite( A_0[side], LOW ); }
else if (LED<=31)    { digitalWrite(A_1[side],HIGH); digitalWrite( A_0[side], HIGH ); }
if      (LED%8==0)    { digitalWrite(C[side],LOW); digitalWrite( B[side], LOW ); digitalWrite( A[side], LOW );}
else if (LED%8==1)    { digitalWrite(C[side],LOW); digitalWrite( B[side], LOW ); digitalWrite( A[side], HIGH );}
else if (LED%8==2)    { digitalWrite(C[side],LOW); digitalWrite( B[side], HIGH ); digitalWrite( A[side], LOW );}
else if (LED%8==3)    { digitalWrite(C[side],LOW); digitalWrite( B[side], HIGH ); digitalWrite( A[side], HIGH );}
else if (LED%8==4)    { digitalWrite(C[side],HIGH); digitalWrite( B[side], LOW ); digitalWrite( A[side], LOW );}
else if (LED%8==5)    { digitalWrite(C[side],HIGH); digitalWrite( B[side], LOW ); digitalWrite( A[side], HIGH );}
else if (LED%8==6)    { digitalWrite(C[side],HIGH); digitalWrite( B[side], HIGH ); digitalWrite( A[side], LOW );}
else if (LED%8==7)    { digitalWrite(C[side],HIGH); digitalWrite( B[side], HIGH ); digitalWrite( A[side], HIGH );}
void loop() { digitalWrite( VCC, HIGH ); connect_LED( 0, 17 ); connect_LED( 1, 6 ); }
```

VIII.2) Anexo 2: Teste de funcionamento da placa de multiplexação analógica (seção III.5.b).

Conectaram-se as saídas da placa de multiplexação analógica com as entradas da placa de LEDs utilizando cabos "flat" com conectores "latch". Da mesma maneira, conectaram-se as entradas digitais da primeira com saídas da placa controladora Arduino Uno. O circuito está na figura 15. Foi usada uma *proto board* para facilitar a descoberta de erros na placa.

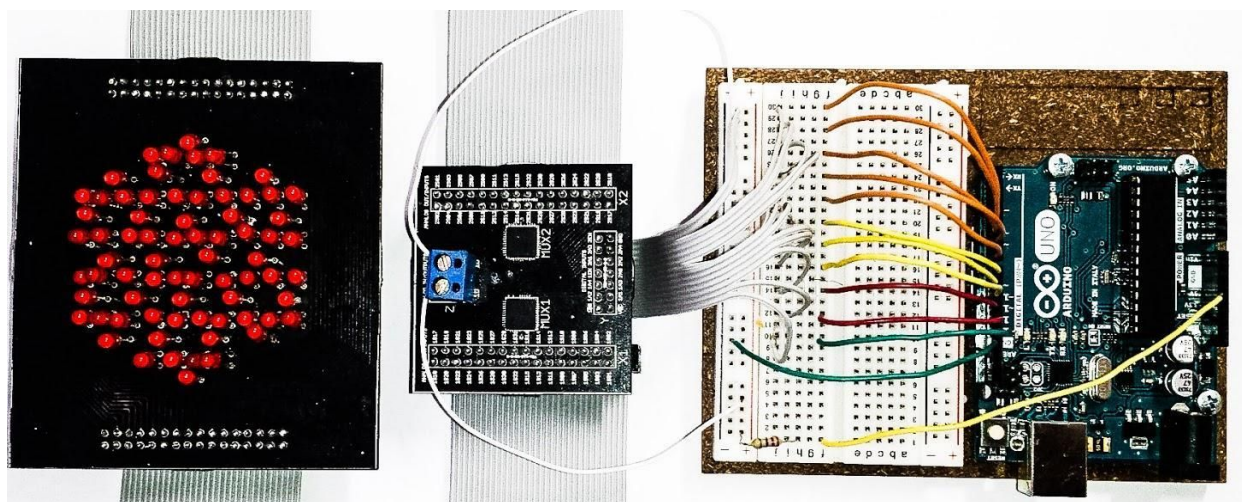


Figura 15: Circuito montado para teste do funcionamento da placa de multiplexação analógica, incluindo placa controladora Arduino Uno, placa de multiplexação e placa de LEDs (de teste).

Através de uma resistência de 200Ω , foi aplicada uma tensão de 5 Volts (HIGH digital) nas entradas analógicas da placa de multiplexação e se executou um código em C++ para acender os LEDs sequencialmente a cada $1ms$. Nessa alta frequência, a olho nu os LEDs iriam parecer todos acesos, facilitando a detecção de irregularidades. O resultado indicou erros na solda das saídas do primeiro multiplexador e das entradas do segundo. Os erros originaram da tecnologia de solda, que não foi apropriada para o tamanho reduzido e o tipo de encapsulamento dos circuitos integrados.