

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
GOIANO - CAMPUS RIO VERDE  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA  
APLIACADA E SUSTENTABILIDADE

DESENVOLVIMENTO DE UM MINI  
POTENCIOSTATO PARA ANÁLISES  
VOLTAMÉTRICAS E AMPEROMÉTRICAS

Autor: Allan Barros Cantasini  
Orientadora: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Polyana Fernandes Pereira  
Coorientador: Prof. Dr. Marcio Vilela

Rio Verde - GO  
Junho 2019

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
GOIANO - CAMPUS RIO VERDE  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA  
APLICADA E SUSTENTABILIDADE

Autor: Allan Barros Cantasini  
Orientadora: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Polyana Fernandes Pereira

Dissertação apresentada, como parte das exigências para obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA APLICADA E SUSTENTABILIDADE, no Programa de Pós-graduação em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano - Campus Rio Verde - Área de concentração Tecnologias e ciência dos Materiais

Rio Verde - GO  
Junho 2019

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
GOIANO - CAMPUS RIO VERDE  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA  
APLICADA E SUSTENTABILIDADE

Sistema desenvolvido pelo ICMC/USP  
Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
**Sistema Integrado de Bibliotecas - Instituto Federal Goiano**

CC229d Cantasini, Allan  
DESENVOLVIMENTO DE UM MINI POTENCIOSTATO PARA  
ANÁLISES VOLTAMÉTRICAS E AMPEROMÉTRICAS / Allan  
Cantasini; orientadora Polyana Fernandes Pereira; co-  
orientador Marcio Vilela. -- Rio Verde, 2019.  
54 p.

Dissertação ( em ENGENHARIA APLICADA E  
SUSTENTABILIDADE) -- Instituto Federal Goiano,  
Campus Rio Verde, 2019.

1. MCP4725. 2. ADS1115. 3. Python. 4. Op77. 5.  
Pyqtgraph. I. Fernandes Pereira, Polyana, orient.  
II. Vilela, Marcio, co-orient. III. Título.

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
GOIANO – CAMPUS RIO VERDE  
DIRETORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO, PESQUISA E INOVAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA APLICADA E  
SUSTENTABILIDADE

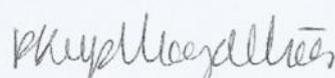
DESENVOLVIMENTO DE UM MINI POTENCIOSTATO  
PARA ANÁLISES VOLTAMÉTRICAS E  
AMPEROMÉTRICAS

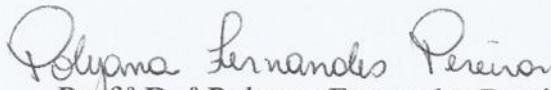
Autor: Allan Barros Cantasini  
Orientadora: Polyana Fernandes Pereira

*TITULAÇÃO:* Mestre em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade – Área  
de concentração Engenharia Aplicada e Sustentabilidade.

APROVADA em 28 de junho de 2019.

  
Prof. Dr. João Areis Ferreira Barbosa  
Junior  
*Avaliador interno*  
IF Goiano / Rio Verde

  
Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Paula Andréa Nascimento dos  
Reys Magalhães  
*Avaliadora externa*  
UNIRV / Rio Verde

  
Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Polyana Fernandes Pereira  
*Presidente da Banca*  
IF Goiano / Rio Verde



**INSTITUTO FEDERAL**  
Goiano

**Repositório Institucional do IF Goiano - RIIF Goiano**  
**Sistema Integrado de Bibliotecas**

**TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR PRODUÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS NO REPOSITÓRIO INSTITUCIONAL DO IF GOIANO**

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610/98, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano, a disponibilizar gratuitamente o documento no Repositório Institucional do IF Goiano (RIIF Goiano), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, em formato digital para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IF Goiano.

**Identificação da Produção Técnico-Científica**

- |  |   |
|--|---|
| <input type="checkbox"/> Tese  | <input type="checkbox"/> Artigo Científico              |
| <input checked="" type="checkbox"/> Dissertação                      | <input type="checkbox"/> Capítulo de Livro              |
| <input type="checkbox"/> Monografia – Especialização                 | <input type="checkbox"/> Livro                          |
| <input type="checkbox"/> TCC - Graduação                             | <input type="checkbox"/> Trabalho Apresentado em Evento |
| <input type="checkbox"/> Produto Técnico e Educacional - Tipo: _____ |   |

Nome Completo do Autor: Allan Barros Cantasini  
Matrícula: 2017102331440025

Título do Trabalho: DESENVOLVIMENTO DE UM MINI POTENCIOSTATO PARA ANÁLISES VOLTAMÉTRICAS E AMPEROMÉTRICAS

**Restrições de Acesso ao Documento**

Documento confidencial:  Não  Sim, justifique: \_\_\_\_\_

Informe a data que poderá ser disponibilizado no RIIF Goiano: 15/11/2019

O documento está sujeito a registro de patente?  Sim  Não  
O documento pode vir a ser publicado como livro?  Sim  Não

**DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA**

O/A referido/a autor/a declara que:

- o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autor/a, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano.

Rio Verde-GO, 28/10/2019.  
Local Data

*Allan Barros Cantasini*

Assinatura do Autor e/ou Detentor dos Direitos Autorais

Ciente e de acordo:

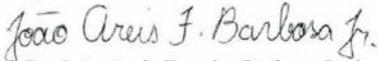
*Polyana Fernandes Pereira*  
Assinatura do(a) orientador(a)

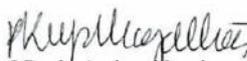


SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL  
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA  
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA GOIANO  
CAMPUS RIO VERDE - GO  
DIRETORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO, PESQUISA E INOVAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA APLICADA E SUSTENTABILIDADE

## ATA Nº 06 (SEIS) BANCA EXAMINADORA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO

Aos vinte e oito dias do mês de junho do ano de dois mil e dezenove, às 13:30 (treze horas e trinta minutos), reuniram-se os componentes da Banca Examinadora: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Polyana Fernandes Pereira (orientadora), Prof. Dr. João Areis Ferreira Barbosa Junior (avaliador interno), Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Paula Andrea Nascimento dos Reis Magalhães (avaliadora externa), sob a presidência do primeiro, em sessão pública realizada na Sala 53 do prédio da Diretoria de Pós-Graduação, Pesquisa e Inovação do IF Goiano – Campus Rio Verde, para procederem a avaliação da defesa de Dissertação, em nível de mestrado, da autoria de **Allan Barros Cantasini**, discente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade do Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde. A sessão foi aberta pela presidente da Banca Examinadora, Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Polyana Fernandes Pereira, que fez a apresentação formal dos membros da Banca. A palavra, a seguir, foi concedida ao autor da Dissertação para, em 30 min., proceder à apresentação de seu trabalho. Terminada a apresentação, cada membro da banca arguiu o examinado, tendo-se adotado o sistema de diálogo sequencial. Terminada a fase de arguição, procedeu-se a avaliação da defesa. Tendo-se em vista as normas que regulamentam o Programa de Pós-Graduação em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade, e procedida às correções recomendadas, a Dissertação foi APROVADA, considerando-se integralmente cumprido este requisito para fins de obtenção do título de **MESTRE EM ENGENHARIA APLICADA E SUSTENTABILIDADE**, na área de concentração Engenharia Aplicada e Sustentabilidade, pelo Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde. A conclusão do curso dar-se-á quando da entrega na secretaria do PPGEAS da versão definitiva da Dissertação, com as devidas correções. Assim sendo, a defesa perderá a validade, se não cumprida essa condição, em até 60 (sessenta) dias da sua ocorrência. A Banca Examinadora recomendou a publicação dos artigos científicos oriundos dessa Dissertação em periódicos de circulação nacional e/ou internacional, após procedida as modificações sugeridas. Cumpridas as formalidades da pauta, a presidência da mesa encerrou esta sessão de defesa de Dissertação de Mestrado, e para constar, eu, Renata Maria de Miranda Rios Resende, secretária do PPGEAS, lavrei a presente Ata, que, após lida e achada conforme, será assinada pelos membros da Banca Examinadora em sete vias de igual teor.

  
Prof. Dr. João Areis Ferreira Barbosa Junior  
*Avaliador interno*  
IF Goiano / Rio Verde

  
Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Paula Andrea Nascimento dos  
Reis Magalhães  
*Avaliadora externa*  
UNIRV / Rio Verde

  
Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Polyana Fernandes Pereira  
*Presidente da Banca*  
IF Goiano / Rio Verde

Aos professores que participaram ativamente, Dr.<sup>a</sup> Polyana Fernandes Pereira, Dr. Marcio Vilela. Alunos de iniciação científica Aline e Mariana.

DEDICO.

A todos Familiares, amigos e principalmente a minha esposa Thaís Vieira do  
Nascimento

OFEREÇO

## AGRADECIMENTOS

A Deus, a minha família que compreendeu os esforços para realizar a pós-graduação. A professora Dr.<sup>a</sup> Polyana Fernandes Pereira, pelos ensinamentos passados, vista a multidisciplinaridade da pesquisa, ao professor Dr. Marcio Vilela, ambos incansáveis pela jornada do saber e as sábias palavras do coordenador do curso de pós-graduação PPGEAS João Areis, presente em todos os momentos.

## BIOGRAFIA DO AUTOR

Allan Barros Cantasini, filho de Elson Marques Cantasini e Maria de Fátima Barros Cantasini, nascido em 12 de novembro de 1983 na cidade de Orlândia estado de São Paulo.

Entre os anos de 2001 a 2003 cursou o ensino médio juntamente com Técnico em processamento de dados e análise de sistema no colégio Albert Einstein, mantido pela FESURV atualmente UNIRV.

Iniciou a graduação em Engenharia de computação em 2003 na Universidade Estadual de Minas Gerais – Campus Ituiutaba e concluiu 2007 participando de pesquisa e extensão de ensino de computação. Nos anos de 2008 a 2009 realizou pós-graduação em finanças na Universidade de Rio Verde, 2009 a 2010 realizou pós-graduação em engenharia de segurança do trabalho na Universidade de São Paulo. Entre os anos de 2011 a 2015 conclui graduação em Direito na Universidade de Rio Verde, sendo que em 2015 realizou pós-graduação em Direito trabalhista na Universidade Anhanguera. Em março de 2018, ingressou no Programa de Pós-Graduação *Stricto sensu* em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade, nível de mestrado, no Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde, sob a orientação da Professora Dr.<sup>a</sup> Polyana Fernandes Pereira.

## ÍNDICE GERAL

	Página
ÍNDICE GERAL .....	V
ÍNDICE DE TABELAS .....	VII
ÍNDICE DE FIGURAS.....	VIII
LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS, ABREVIACÕES E UNIDADES .....	IX
RESUMO .....	X
ABSTRACT .....	XI
1.INTRODUÇÃO GERAL .....	12
1.1 Considerações Gerais.....	12
1.2 Potenciostato.....	13
1.3 Breve revisão sobre potenciostatos portáteis para fins analíticos.....	16
1.4 Microcomputador Raspberry Pi.....	20
1.5 Interface entre Raspberry e potenciostato.....	21
1.6 Métodos Eletroquímicos.....	22
1.6.1 Voltametria Cíclica (VC).....	23
1.6.2 Amperometria.....	24
2. OBJETIVOS .....	25
2.1 Objetivo geral.....	25
2.2 Objetivos específicos .....	26
Referências Bibliográficas.....	27
DESENVOLVIMENTO DE ALGORITMO PARA AMPERIMETRIA VOLTAMETRIA CÍCLICA.....	30
RESUMO.....	30
ABSTRACT.....	30
3.0 INTRODUÇÃO.....	31
3.1 EXPERIMENTO.....	32
3.2 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	35
3.3 CONCLUSÃO.....	37
Referências Bibliográficas.....	38

CRITÉRIOS USADOS PARA DESENVOLVIMENTO DE MINIPOTENCIOSTATO	
USANDO RASPBERRY PI.....	39
RESUMO.....	39
ABSTRACT.....	39
4.0 INTRODUÇÃO.....	40
4.1 EXPERIMENTO.....	41
4.2 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	42
4.3 CONCLUSÃO.....	46
Referências Bibliográficas.....	46
TRABALHOS FUTUROS.....	48
APÊNDICE – ESQUEMA PLACA ELETRÔNICA.....	49

## ÍNDICE DE TABELAS

	Página
<b>Tabela 1.</b> Comparação entre as características do potenciostato proposto e os não comerciais desenvolvidos anteriormente.....	16

## ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
<b>Figura 1.</b> Potenciostato básico.....	13
<b>Figura 2.</b> Forma de onda de tensão para amperometria e voltametria cíclica.....	14
<b>Figura 3.</b> Simulação em software Proteus.....	15
<b>Figura 4.</b> Esquema da placa de circuito impresso em software kicad.....	15
<b>Figura 5.</b> Potenciostato desenvolvido em laboratório.....	16
<b>Figura 6.</b> Raspberry Pi 3.....	21
<b>Figura 7.</b> Placa de entrada e saída analógica.....	22
<b>Figura 8.</b> Pinos SDA1 e SCL1 em uso – barramento I2C no Raspberry Pi B+.....	23
<b>Figura 9.</b> Forma de onda triangular e resposta .....	24
<b>Figura 10.</b> Esquema de aplicação de pulsos de potenciais e amperograma obtidos.....	25
<b>Figura 11.</b> Geração de forma de onda triangular.....	32
<b>Figura 12.</b> Fluxograma de geração de onda triangular.....	33
<b>Figura 13.</b> Fluxograma de leitura de corrente.....	33
<b>Figura 14.</b> Geração de sinal para amperometria.....	34
<b>Figura 15.</b> Fluxo de dados do potenciostato.....	35
<b>Figura 16.</b> Teste de voltametria cíclica para concentrações crescentes de etanol em meio de NaOH 0,1M e eletrodo de ouro.....	36
<b>Figura 17.</b> Teste de amperometria de múltiplos pulsos utilizando NaOH 0,1M.....	36
<b>Figura 18.</b> Disposição de resistores e capacitor – dummy cell.....	41
<b>Figura 19.</b> Circuito eletrônico do potenciostato.....	42
<b>Figura 20.</b> Imagem do Potenciostato desenvolvido.....	43
<b>Figura 21.</b> Sinal gerado no método da amperometria de múltiplos pulsos. Pulsos de potenciais aplicados: +0.18 V/100ms, +0.70 V/300ms e -0.25 V/300ms.....	44
<b>Figura 22.</b> Entrada de dados em método da amperometria de múltiplos pulsos.....	45
<b>Figura 23.</b> Sinal gerado para voltametria cíclica. Faixa de potencial: -0,2 a +1,2 V.....	45
<b>Figura 24.</b> Entrada de dados no método da Voltametria Cíclica.....	46

## LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS, ABREVIACÕES E UNIDADES

DDP	-----	Diferença de potencial
WE	-----	Eletrodo de trabalho
RE	-----	Eletrodo de Referência
CE	-----	Contra Eletrodo
I <sup>2</sup> C	-----	<i>Inter-Integrated Circuit</i>
DAC	-----	Conversor Digital para analógico
ADC	-----	Conversor analógico Digital
μA	-----	Microamperes
mA	-----	Miliamperes
pA	-----	Pico amperes
SDA	-----	<i>Serial data</i>
SCL	-----	<i>Serial Clock</i>

## RESUMO

CANTASINI, ALLAN BARROS. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano - Campus Rio Verde, abril de 2019. **Desenvolvimento de um minipotenciostato para análises voltamétricas e amperométricas**. Orientadora: Dr.<sup>a</sup> Polyana Fernandes Pereira. Coorientador: Dr. Marcio Vilela.

A interdisciplinaridade de conhecimentos específicos em química, eletrônica e computação, tem contribuído para o desenvolvimento científico e tecnológico em sensoriamentos, controle, automação, instrumentação analítica, análises de combustíveis, análises ambientais e controle de qualidade. Com objetivo de realizar análise voltamétricas e amperométricas, foi desenvolvido um potenciostato com robustez, miniaturizado, portátil e de baixo custo, mediante a confecção de placa de aquisição de dados conectada através de rede I2C com microcomputador Raspberry Pi. A primeira técnica implementada foi a voltametria cíclica a qual se aplica tensão de triangular em solução química e tem como resultado um plano cartesiano relacionando tensão x corrente. A segunda técnica desenvolvida foi a amperometria de múltiplos pulsos, que é aplicada um pulso de tensão (em determinado período de tempo) e tem como resultado um plano cartesiano de corrente x tempo. Em ambos algoritmos foi utilizado a linguagem de programação python, pela facilidade de desenvolvimento, acesso a hardware e ser linguagem padrão de programação no computador Raspberry Pi. Vale ressaltar que foi utilizada biblioteca gráfica pyqtgraph, que possibilitou a visualização de gráficos em tempo real e a exportação de dados para softwares estatísticos, no presente projeto programa Calc nativo da distribuição Raspbian. Como dispositivo de entrada e saída de placa de aquisição foram utilizadas duas placas, a primeira ADS1115 a qual realiza mediações de corrente e a segunda placa utilizada MCP4725 realiza variação de tensão. O amplificador OP77 foi escolhido para desenvolvimento de placa de aquisição de dados pela alta capacidade de ganho e rápida estabilização. Todo circuito eletrônico foi simulado no software Proteus e feito placa de circuito impresso em software livre Kicad.

**PALAVRAS-CHAVE:** MCP4725, ADS1115, python, op77 e pyqtgraph.

## ABSTRACT

CANTASINI, ALLAN BARROS. Goiano Federal Institute of Education, Science and Technology - Rio Verde Campus, April 2019. **Development of a mini potentiostat for voltametric and amperimetric analysis.** Advisor: Dr.<sup>a</sup> Polyana Fernandes Pereira. Co-advisor: Dr. Marcio Vilela.

The interdisciplinarity of specific knowledge in chemistry, electronics and computing has contributed to the scientific and technological development in sensory, control, automation, analytical instrumentation, fuel analysis, environmental analysis and quality control. With the objective of performing voltametric and amperimetric analysis, a potentiostat with robustness, miniaturized, portable and low cost, was developed by making a data acquisition card connected through I2C network with Raspberry Pi microcomputer. The first technique implemented was the cyclic voltammetry to which triangular voltage is applied in chemical solution and has resulted in a Cartesian plane relating voltage x current. The second technique developed was the multiple pulses amperometry, which is applied a voltage pulse (in determinate period of time) and results in a Cartesian plane of current x time. In both algorithms it was used the python programming language, due to its easy of development, access to hardware and to be standard programming language in the Raspberry Pi computer. It is noteworthy that a graphical pyqtgraph library was used, which enabled the visualization of real time graphs visualization and the data export to statistical software, in the present project Calc native program of the Raspbian distribution. As the input and output device of the acquisition board two plates were used, the first ADS1115 which performs current measurements and the second plate used MCP4725 performs voltage variation. The OP77 amplifier was chosen for data acquisition board development due to high gain and rapid stabilization. Every electronic circuit was simulated in Proteus software and made printed circuit board in Kicad free software.

**KEYWORDS:** MCP4725, ADS1115, python, op77 and pyqtgraph.

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1 Considerações Gerais

Com a evolução da eletrônica miniaturizada e da informática aplicada aos novos hardwares foi possível desenvolver um minipotenciostato utilizando amplificadores operacionais modernos e equipamentos de rede. O desenvolvimento da eletrônica embarcada com softwares e hardwares dedicados com alta capacidade de processamento de dados, linguagens de programação de alto nível, grande quantidade de bibliotecas, voltadas a ciências de dados, acesso a hardwares, computação gráfica e portabilidade, possibilitou avançar na elaboração de um hardware e software dedicados a um potenciostato.

Os potenciostatos podem ser usados para testar compostos eletroquimicamente ativos e soluções microbióticas com aplicações em diversas áreas, tais como: monitoramento ambiental, testes de alimentos, farmacêuticos e medicinais, abordado no texto a seguir.

O monitoramento ambiental de acordo com Camprodom (2019), é realizado através da medição de monóxido de carbono, dióxido de nitrogênio e sensores eletroquímicos, ligados a placa exclusiva sem fio, utilizado em centros urbanos.

A técnica eletroquímica foi aplicada para detecção de pesticidas em alimentos, salmonelas em carne de porco e resíduos de drogas de uso veterinário no leite, com aplicação de métodos eletroquímicos em testes em alimentos citado por Li (2019).

A aplicação na medicina forense foi analisada excreções humanas para detecção de drogas ilícitas, sendo as técnicas eletroquímicas uma opção de baixo custo e portátil, pelo uso na área do fármaco, baseado em Florea (2018).

Conforme Cruz (2014), o método eletroquímico de voltametria cíclica é utilizado para detecção do cortisol, relacionado com o sistema imunológico de pacientes. Sendo facilitador na atividade diária na área médica.

No estudo de imunodeficiência em pacientes com vírus HIV segundo Kaushik (2015) é utilizado o método eletroquímico da voltametria cíclica para sua detecção. Desse modo, há a comparação com o teste de ELISA, que possibilita melhor monitoração da saúde do paciente.

A partir da literatura explanada acima ficou demonstrado a aplicabilidade do

potenciostato em diferentes áreas do conhecimento, o que justifica este projeto. Seu resultado é a corrente elétrica gerada através de aplicação de tensão em uma solução química obtida de maneira instantânea, precisa, ágil e em tempo real. Se comparado a outros métodos de análises químicas, os métodos eletroquímicos têm o tempo de análise reduzido e consistência dos dados obtidos.

O projeto foi realizado em linguagem de programação Python que visa: 1 – qualidade e monitoramento de variáveis de processo; 2 – relatórios de análises eletroquímicas; 3 - instrumentação virtual; 4 - acesso remoto; e 5 - confiabilidade dos dados.

Este projeto apoia-se nas licenças código livre, a seguir: Linux, Raspberry, Python; interação com software de planilha eletrônica gratuita Calc; comunicação e desenvolvimento visual de alto nível, para análise de dados e geração de gráficos como base na biblioteca Pyqtgraph, voltados para gráficos científicos e criada pelo MIT (Instituto de Tecnologia de Massachusetts).

## 1.2 Potenciostato

O dispositivo potenciostato foi desenvolvido por A. Hickling em 1942, em forma de circuito eletrônico com o objetivo de controlar a DDP entre três eletrodos (trabalho, referência e auxiliar). a aplicação de tensão é realizada entre os eletrodos de trabalho e referência e a corrente elétrica circula entre os eletrodos de trabalho e auxiliar. Os sinais gerados são medidos utilizando os amplificadores operacionais (BIOLOGIC, 2010).

A Figura 1 representa um circuito básico de um potenciostato com três eletrodos.

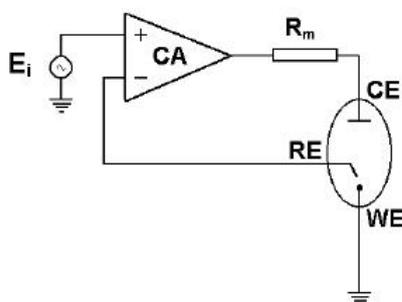


Figura 1 – Potenciostato básico (BIOLOGIC, 2010).

Eletrodos são condutores de elétrons, pois na eletroquímica as reações são

baseadas em oxirreduções, havendo transferências de elétrons entre substâncias, sendo o potenciostato o dispositivo usual (RAMÍREZ, 2017).

A partir da injeção de tensão nos eletrodos de trabalho (WE) e referência (RE), há corrente elétrica que circula no contra eletrodo (CE) através do resistor ( $R_m$ ). Neste projeto houve a aplicação de tensão na forma triangular para o desenvolvimento do método da voltametria cíclica e aplicação de tensão na forma de pulsos para o desenvolvimento da amperometria de múltiplos pulsos, na qual são aplicadas determinadas tensões nos eletrodos WE e RE em determinados períodos de tempos.

O eletrodo de trabalho (WE) funciona como cátodos havendo oxidação e redução; o de referência (RE) como ânodo, sendo que os elétrons se movimentam do cátodo para solução, atraídos pelo ânodo. Para evitar queda de tensão é usado o eletrodo auxiliar (CE) no qual flui corrente para o eletrodo de trabalho. Logo que a corrente passar pelo eletrodo de referência, ficará polarizada, o que significa que o potencial irá variar a corrente (BLANCO, 2006).

O princípio de funcionamento é baseado em amplificadores operacionais, sistema com duas entradas e uma saída, sendo de grande valia para a variação de potencial e leitura de corrente elétrica, com a finalidade de realizar operações matemáticas. Logo, se ocorrer uma variação de tensão na entrada, os amplificadores terão saída de 10 milhões de vezes, monitorados em tempo real, como pode ser observado na Figura 2.

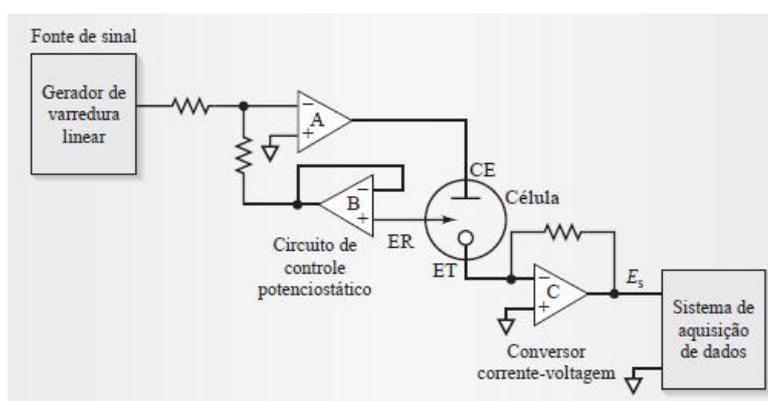


Figura 2– Potenciostato completo (SKOOG, 2006)

Foi utilizado o software de simulação Proteus para realização de testes, mensurar resistências, e utilizar capacitores a fim de filtrar os sinais em manter confiabilidade de medições e diminuindo ruídos em placa eletrônica minimizando medições errôneas. O software de simulação possibilitou testes com diferentes configurações e faixas de

correntes suportadas em potenciostatos (Figura 3). Sendo utilizados amplificadores com saídas reversoras de sinais, somador, subtrator e integrador.

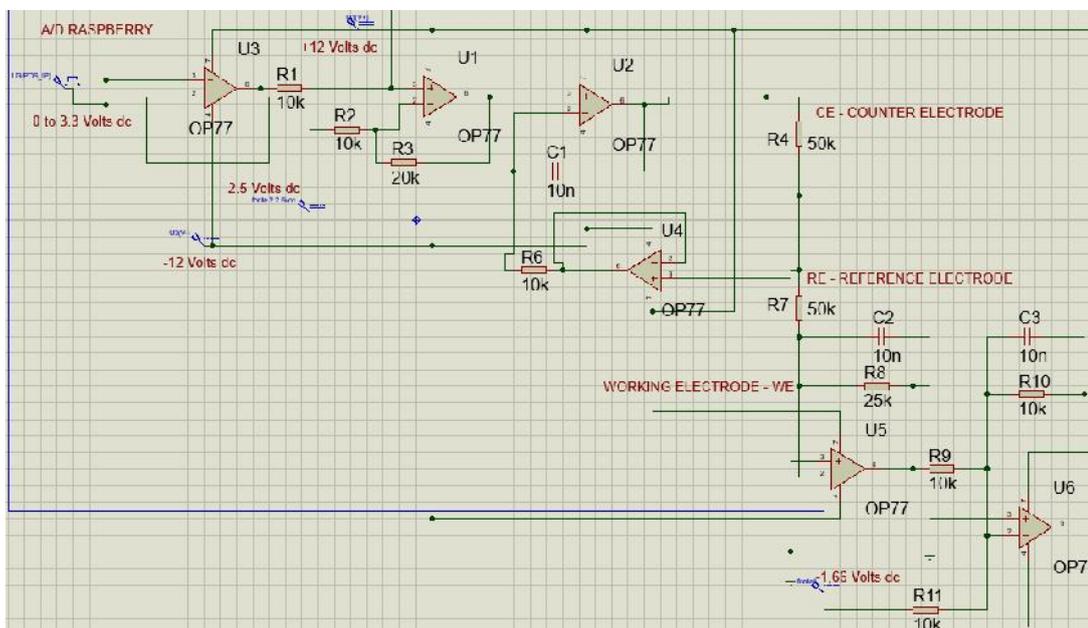


Figura 3 – Simulação em software Proteus.

Realizado teste em software de simulação eletrônica foi confeccionado placa de circuito impresso utilizando software livre Kicad, conforme Figura 4.

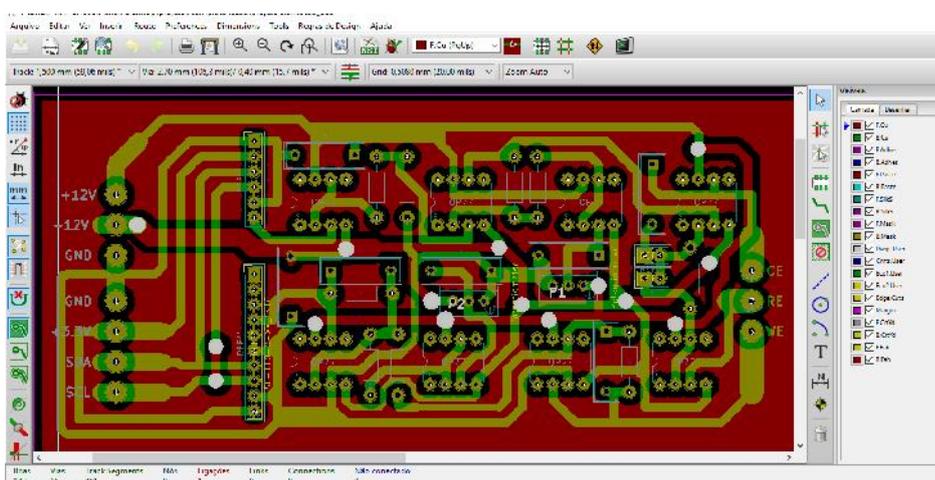


Figura 4 – Esquema da placa de circuito impresso em software kicad.

Após confecção de placa de circuito impresso os componentes foram soldados em placa, e adicionados conectores, placas de entrada analógica ADS1115 e placa de saída analógica MCP4725, ambas com comunicação via rede I2C. A Figura 5 representa

a placa do potenciostato desenvolvido, que possui como entradas uma fonte simétrica de  $\pm 12V$ , conectores I2C, terra e 3.3V, com saída conector para ligação dos eletrodos RE, WE e CE.



Figura 5- Potenciostato desenvolvido em laboratório.

Após o desenvolvimento dos circuitos para o potenciostato, estudos foram voltados para aplicação das técnicas de voltametria cíclica e amperometria de múltiplos pulsos.

### 1.3 Breve revisão sobre potenciostatos portáteis para fins analíticos

Diante do avanço da eletrônica e redução de custo de microprocessadores e computadores, é possível encontrar na literatura o desenvolvimento de vários potenciostatos não comerciais de baixo custo, como pode ser observado na Tabela 1.

**Tabela 1.** Comparação entre as características do potenciostato proposto e os não comerciais desenvolvidos anteriormente.

Método	Controlador	Software de Programação	Faixa de tensão	Faixa de corrente	Ref.
Voltametria cíclica	Raspberry Pi model A+	LuaJIT	-4 a +4v	1 $\mu$ A a 20mA	(NAGATA 2018,)

Voltametria cíclica, linear e cronoamperometria	Arduino	Labview	-2,5 a +2,5v	10 $\mu$ A a 10mA	(LI, 2018)
Voltametria cíclica e amperometria	Pic24	Matlab R2012	-2,5 a +2,5v	-	(PRUNA, 2018)
Voltametria cíclica, voltametria linear, voltametria de pulsos diferenciais, amperometria, potenciometria	C8051F005	Labview	-1.6 a +1.6v	$\pm$ 160 nA a $\pm$ 16 mA	(HUANG, 2017)
Voltametria cíclica	-	Aplicativo Android - TongueMetrix	-	-	(GIARDANO, 2016)
Voltametria cíclica e cronoamperometria	STM32F4	Labview	0 a 20v	0 a 2A	(SEGURA, 2016)
Voltametria e amperometria	Atmel ATXMEGA 256A3U	DStat - python	-1.46 a +1.46 v	22mA	(DRYDEN, 2015)
Voltametria cíclica	ATMEGA328	PotCon	-	-	(KELLNER, 2015)
Voltametria cíclica	PIC16F685	Smartphone App.	-	100 pA a 10 $\mu$ A	(SUN, 2014)
Amperometria	Philips, PM3320A Hewlett Packard, HP4195A	Equipamentos de medição	2.5v	260 $\mu$ A	(STEINBERG, 2004)
Voltametria cíclica	STM32F407	-	-2 a 2v	-	(RAMÍREZ, 2017)

Voltametria e amperometria	AT89C51	Software em PDA -Visual Basic	0 a 5v	1 $\mu$ A a 1mA	(HUANG, 2004)
Voltametria e amperometria	PIC 18F4550	Labview 7.1	0 a 5v	-	(BLANCO, 2006)
Voltametria Cíclica e amperometria	Raspberry Pi modelo B+	Python 2.7	-1.66 a +1.66	100 $\mu$ A	Este

O texto a seguir discorre artigos de desenvolvimento de potenciostatos, usados como base.

Um potenciostato de baixo custo do tamanho de um cartão de crédito, controlado por um Raspberry Pi B+ e softwares desenvolvido em linguagem Lua, houve a implementação da técnica da voltametria cíclica conforme Nagata (2018). Apresentou faixa de tensão de -4 a 4V com faixa de leitura de corrente de 1 $\mu$ A a 20mA. No referido artigo foi contemplado o teste da lei de ohm, mostrando a linearidade de tensão em relação a corrente, a utilização de filtros Bessel nos amplificadores operacionais.

O desenvolvimento de um potenciostato de baixo custo para o ensino de química foi visto por Li (2018). Neste estudo foi implementado os métodos da Voltametria cíclica, linear e cronoamperometria, com uma faixa de tensão de -2.5 a 2.5A e faixa de leitura de corrente de 10 $\mu$ A a 10mA, foi utilizado software proprietário Labview e controlador Arduino. Neste artigo houve destaque utilização do dispositivo *plug-and-play*.

De acordo com Pruna (2018) foram implementados os métodos da voltametria cíclica e amperometria, utilizou-se software proprietário MATLAB R12, o microcontrolador PIC24 e PIC32 como interface com computador um para geração de sinais, foi utilizado critério de Barkhausen com feedback ao circuito para minimizar ruídos de medições.

O microcontrolador C8051F005 foi utilizado para implementar os métodos da voltametria cíclica, voltametria linear, voltametria de pulsos diferenciais, amperometria e potenciometria. Foi utilizado software proprietário Labview com faixa de tensão -1.6 a 1.6V, leitura de corrente de 78pA a 16mA com conversor DAC com 12-bits de resolução com saída de 0 a 2.4V, se difere, pois, possui sistema de *auto-range* para seleção de resistência (HUANG, 2017).

A tecnologia de sem bluetooth foi utilizada em aplicativo Android TongeMatrix para o desenvolvimento de um potenciostato multivariável com processamento em

*smartphone*. Neste estudo foi implementado o método da voltametria cíclica por Giardano (2016) com acesso remoto e portabilidade.

O software proprietário Labview foi utilizado para implementação dos métodos da voltametria cíclica e cronoamperometria, com faixa de tensão de 0 a 20V, microcontrolador STM32F4, faixa de corrente de 0 a 2A, conversores ADC com resolução de 12-bits e modulo de aquisição de dados NI-USB 6009 projetado por Segura (2016).

O potenciostato livre D-Sat desenvolvido com linguagem de programação python, com hardware livre e atualizações foi utilizado por Dryden (2015) para implementação dos métodos de voltametria e amperometria, com faixa de tensão de -1.46 a +1.46v, corrente de 22mA, com conversor DAC de 16-bits com controle de 46 $\mu$ V.

O uso de planilhas eletrônicas salvas em arquivos .csv e visto no desenvolvimento de um potenciostato de baixo custo com implementação do método da voltametria cíclica por Kellner (2015) e a utilização de conversores DAC de 16 bits, com maior precisão na varredura de potencial.

A utilização de entradas de áudio de um smartfone foi vista por Sun (2014) no desenvolvimento de um potenciostato, com faixa de leitura de corrente que varia de 100pA a 10 $\mu$ A, utilizou sinais PWM para gerar formato de onda triangular, minimizando carga computacional e utilizando o microcontrolador para correção de erros.

Um osciloscópio digital da marca Philips, modelo PM3320A, gerador de frequência da marca Philips, modelo PM2525 e um analisador de espectro da marca Hewlett Packard, modelo HP4195A, foi utilizado por Steinberg (2004), para aplicação dos métodos da amperometria.

Os critérios para o desenvolvimento de um potenciostato, foi visto por Ramírez (2017) no método da voltametria cíclica, usando microcontrolador STM32F407, faixa de tensão de -2 a 2V, com utilização de método de filtro de sinal Kalman, que se baseia em estimar valores fazer sua média ponderada, de maneira preditiva. Concluindo que a solução para estabilidade de medições é a utilização de DAC e ADC incorporadas ao microcontrolador.

Um potenciostato com comunicação da dados via rede GPRS foi visto por Huang (2004), com ADC e DAC com resolução de 12-bits e microcontrolador AT89C51. Os resultados foram semelhantes ao potenciostato comercial, e as medições eletroquímicas a distância pode ser usada para cuidar da saúde em casa através de seu monitoramento remoto.

O microcontrolador PIC18F4550 com funcionalidade USB para comunicar com placa eletrônica do potenciostato e computador, através de linguagem proprietária Labview, com nível baixo de ruído com 50pA, explanado por Blanco (2016).

A pesquisa teve como base a literatura dos artigos descritos acima, para desenvolver um potenciostato e implementar o software em linguagem python. Foi utilizada o DAC com resolução de 12-bits, ADC com resolução de 16-bits, ambas incorporadas via rede I2C com controlador, com faixa de corrente de -110 a 140 $\mu$ A, tensão de -1.65 a 1.65V, a utilização de filtro Bessel para minimizar ruídos em medições com custo de R\$500,00. Atualmente um potenciostato comercial tem o valor entre R\$15.000,00 a R\$70.000,00 de acordo com suas funcionalidades. Já o potenciostato desenvolvido tem como vantagem a geração de ondas e processamento de sinal simultaneamente, através de recursos computacionais de threads para aplicação dos métodos da voltametria cíclica e amperometria.

#### 1.4 Microcomputador Raspberry Pi

Raspberry Pi é um computador de baixo custo do tamanho de um cartão de crédito, com custo de 25 a 35 USD, desenvolvido no Reino Unido pela *Fundação Raspberry*, para intensificar o ensino de computação (JAIN, 2018).

Há os modelos de Raspberry A e B, o modelo A tem 256Mb de RAM, uma porta USB e sem conexão de rede. O modelo B tem 512Mb de RAM, 2 portas USB e uma porta Ethernet, sistema Broadcom BCM2835 em um chip que inclui um processador ARM1176JZF -S 700 MHz, GPU Vídeo Core IV e um cartão SD. A GPU é capaz de reproduzir a qualidade de Blu-ray, usando H.264 a 40Mbits/s. Tem um núcleo 3D rápido acessado usando as bibliotecas OpenGL ES2.0 e OpenVG fornecidas (JAIN, 2018)

Neste estudo foi utilizado o modelo B+ figura 6 que se destaca pela maior quantidade de memória RAM 1Gb, processador BCM2837 64bit 1.2Ghz, Bluetooth 4.1 e Wi-fi integrados a placa.

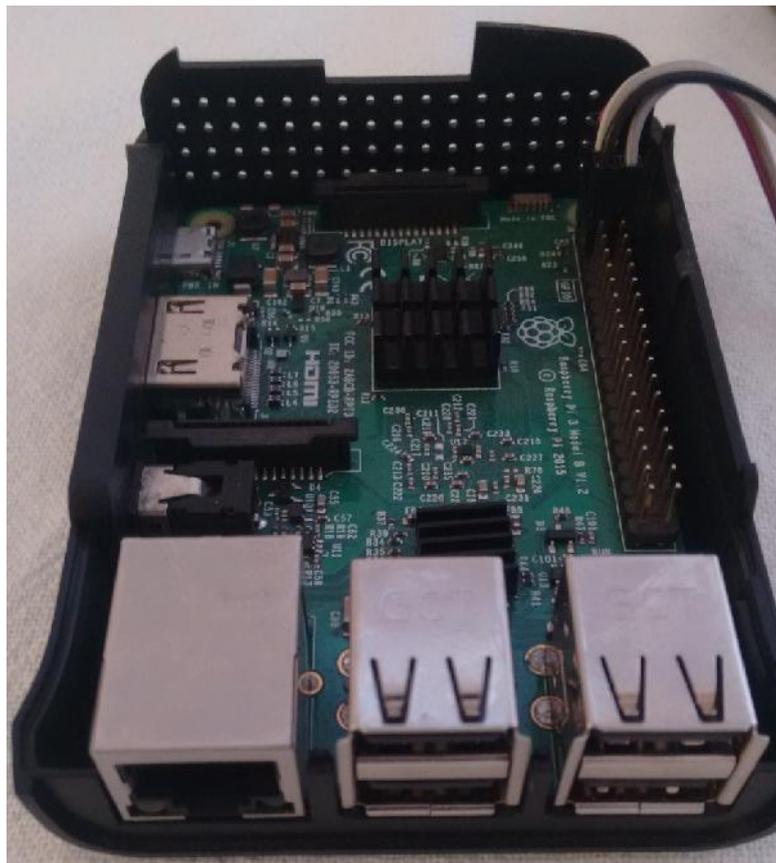


Figura 6 – Raspberry Pi 3

O Raspberry é compatível com sistemas operacionais GNU/Linux e Windows 10 IoT versão gratuita, conta com sistema operacional Raspbian versão modificada da distribuição Debian/Linux, com a linguagem python como referência do sistema (JAIN, 2014).

A utilização do Raspberry Pi B+ no desenvolvimento do potenciostato se deu através da alta frequência de processamento com processador de 1.2Ghz, indicado para cálculos intensos, a utilização de placas de aquisição de dados via GPIO, com suporte a rede I2C, com suporte de até 860 medições/segundo em placas e comunicação e utilização da linguagem de programação python nativa do sistema, com compatibilidade com hardware do Raspberry, portabilidade e utilização de bibliotecas gráficas como pyqtgraph e matplotlib, que são essenciais para plotagem exportação dos dados para outras plataformas estatísticas.

### 1.5 Interface entre Raspberry e potenciostato

A interface entre placa de aquisição de dados e Raspberry se dá através de duas

placas com comunicação I2C, uma funciona como entrada analógica e a outra como saída analógica.

A placa ADC (*Analog to Digital Convertor*) ADS1115 tem taxa de amostragem que varia de 8 a 860 SPS, com resolução de 16 bits, alimentação de 2 a 5V, pode ser configurada usando 04 canais independentes ou 02 canais diferenciais, possui um amplificador com ganho programável, de até 16x, com consumo de 150 $\mu$ A (PIRI, 2015).

A placa DAC (*Digital to Analog Convertor*) MCP4725, tem tensão de alimentação de 2.7 a 5.5V, 01 canal de saída, resolução de 12 bits, endereçável, tempo de atuação de 6  $\mu$ s, configuração de velocidade padrão de 100Kbps, 400KBPS ou 3.4MBPS, corrente máxima de saída de -25 a 25mA (MARTÍNEZ, 2015).

A Figura 7 representa as placas ADS1115 e MCP4725 já fixadas em potenciostato desenvolvido, sendo a MCP4725 a placa de entrada responsável pela geração de onda e a ADS1115 a placa de saída que fará a leitura de corrente sendo a saída.



Figura 7 –Placa de entrada e saída analógica.

Como pode ser observado na Figura 8, No Raspberry é utilizado os pinos 3 e 5 que são chamados de SDA1 (*Serial data*) e SCL1 (*Serial Clock*) respectivamente, pinos nativos do barramento I2C, que suporta até 127 dispositivos, com velocidades de até 3.4Mbps, com Raspberry para armazenamento dos dados.



Figura 8 –Pinos SDA1 e SCL1 em uso – barramento I2C no Raspberry Pi B+.

O software foi desenvolvido em linguagem python, enviando dados de (tensão) e recebendo (corrente elétrica) de endereços I2C, convertidos em valores reais de tensão a corrente, e mostrado na forma de gráfico usando a biblioteca pyqtgraph.

## 1.6 Métodos Eletroquímicos

Os métodos eletroquímicos se destacam pelo seu baixo custo de implantação, facilidade e simplicidade de construção. Trata-se de um conjunto de métodos analíticos baseados nas medidas de propriedades elétricas (potencial, corrente, quantidade de carga, condutividade e massa) de uma solução contendo a espécie de interesse. Existem diferentes tipos de métodos eletroanalíticos, tais como potenciometria (medida de potencial), condutimetria (medida de condutividade), coulometria (medida da quantidade de carga), eletrogravimetria (medida da massa obtida por eletrodeposição), amperometria e voltametria (medida de corrente) (FUENTES,2013).

Os métodos eletroanalíticos desenvolvidos para o potenciostato proposto foram: voltametria cíclica e amperometria de múltiplos pulsos.

### 1.6.1 Voltametria Cíclica (VC)

Uma das técnicas eletroquímicas desenvolvidas nesse trabalho foi a VC. Trata-se de uma técnica que depende da medida de corrente em função do potencial aplicado, ou seja, o potencial é aplicado entre o eletrodo de trabalho e o eletrodo de referência em

forma de varredura e a corrente resultante é registrada simultaneamente. A curva corrente versus potencial obtida é chamada de voltamograma. Os principais atributos responsáveis pela popularização, em diversas áreas de aplicação, dessa técnica são: facilidade de utilização, consumo mínimo do analito e versatilidade.

A Figura 9 mostra a aplicação de potencial em forma de onda triangular e o voltamograma obtido

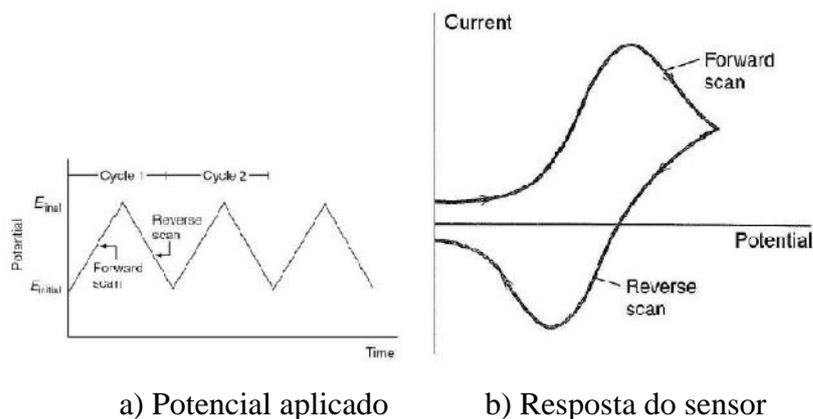


Figura 9 – Forma de onda triangular e resposta (FUENTES, 2013).

A análise dos voltamogramas cíclicos indica em que região de potencial ocorre determinada reação de oxidação e/ou redução de compostos eletroativos, além de indicar informações a respeito da reversibilidade das reações, da quantidade de elétrons envolvidos, da possível formação de espécies intermediárias e se o sistema é controlado por processos difusionais ou adsortivos.

### 1.6.2 Amperometria

A amperometria se refere a leitura de corrente a um potencial constante adequado em função do tempo, no qual ocorre a oxidação ou redução eletroquímica dos compostos eletroativos de interesse. (BRET, 1996).

Essa técnica pode ser utilizada no modo pulsado, permitindo a aplicação de dois ou mais pulsos de potenciais em função do tempo, diminuindo ou evitando problemas em relação à contaminação ou passivação da superfície do eletrodo de trabalho. Superfícies de eletrodo constantemente limpas e eletroquimicamente ativas no transcorrer da análise podem aumentar consideravelmente a obtenção de respostas estáveis, reprodutíveis e

relacionáveis com a concentração do analito na solução (faixa linear de trabalho).

A curva corrente versus tempo obtida é chamada de amperograma. A Figura 10 representa um modelo de aplicação dos pulsos de potenciais e o amperograma obtido.

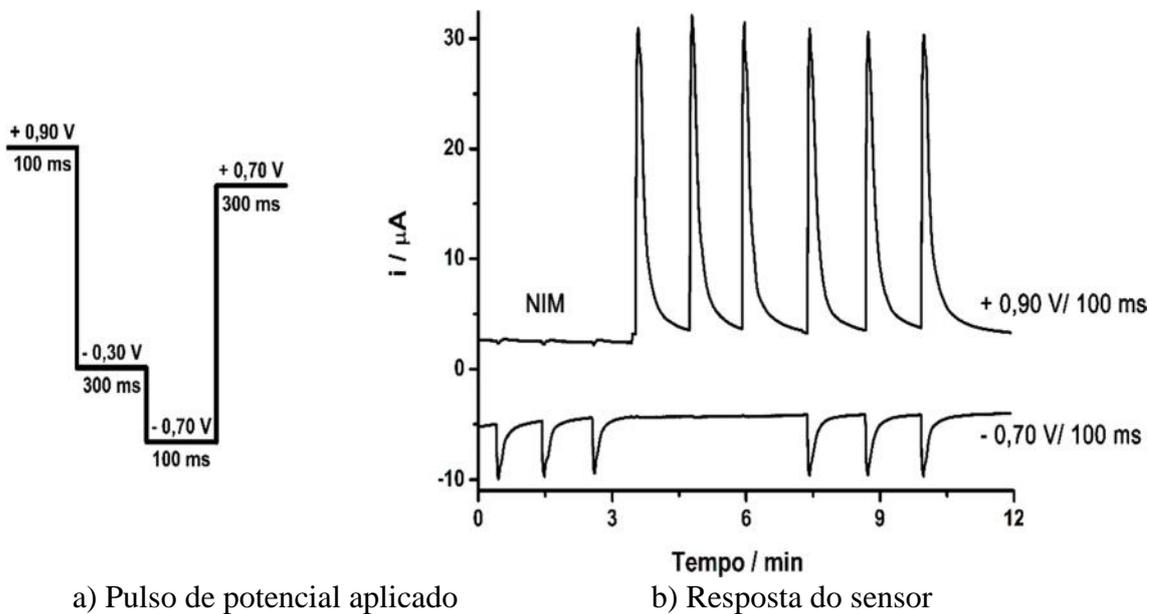


Figura 10. Esquema de aplicação de pulsos de potenciais e amperograma obtidos.

Neste modelo os pulsos de potenciais  $-0,3 \text{ V}/300\text{ms}$  e  $+0,7 \text{ V}/300\text{ms}$  foram aplicados para limpeza eletroquímica da superfície do eletrodo de trabalho e os pulsos de potenciais  $+0,9\text{V}/100\text{ms}$  e  $-0,7\text{V}/100\text{ms}$  foram aplicados para detecção eletroquímica das espécies de interesse presentes em solução. A corrente gerada é proporcional a concentração das espécies.

Neste projeto o método de amperometria de múltiplos pulsos foi implementado a partir de um thread em linguagem de programação python, visto alto poder de processamento do Raspberry Pi B+, potenciostatos comerciais há possibilidade de testar até 05 tensões diferentes, em potenciostato desenvolvido foi feito para 10 tensões e 10 períodos de tempo diferentes.

## 2. OBJETIVOS

### 2.1 Geral

Desenvolver um potenciostato simples, controlado por Raspberry Pi e com interface, usando linguagem python, para realização de medidas voltamétricas e

amperométricas.

## 2.2 Específicos

- Estudar os métodos eletroquímicos de amperometria e voltametria cíclica;
- Instalar o sistema operacional Raspbian;
- Configurar Raspberry Pi para leitura e escrita em barramento de dados I2C;
- Avaliar a placa eletrônica em softwares de simulação Proteus;
- Avaliar a utilização das placas analógicas ADS1115 e MCP4725;
- Especificar as placas de comunicação I2C;
- Minimizar ruídos eletrônicos em placa amplificadora de sinal;
- Desenvolver uma placa eletrônica em software de circuito impresso Kicad;
- Programar em linguagem Python;
- Desenvolver algoritmo para métodos de amperometria e voltametria;
- Utilizar a biblioteca gráfica para python pyqtgraph;
- Exportar dados colhidos para software de planilha eletrônica;
- Analisar em laboratório a eficiência da placa em solução de etanol e metanol.

## Referências Bibliográficas

NAGATA, T.; SUZUKI, K. Building a Low-cost Standalone Electrochemical Instrument Based on a Credit Card-sized Computer. **Analytical Sciences, The Japan Society for Analytical Chemistry**, v. 34, p. 1213-1216, out. 2018.

LI, Y., C. An Easily Fabricated Low-Cost Potentiostat Coupled with UserFriendly Software for Introducing Students to Electrochemical Reactions and Electroanalytical Techniques. **ChemicalEducation, American Chemical Society and Division of Chemical Education, Inc.** v. 95, p. 1658-1661, 2018.

PRUNA, Raquel; PALACIO, Francisco; BARAKEB, Abdoullatif; ZINE, Nadia; STREKLAS, Angelos; BAUSELLS, Joan; ERRACHID, Abdelhamid; LÓPEZ, Manel; **A low-cost and miniaturized potentiostat for sensing of biomolecular species such as TNF- by electrochemical impedance spectroscopy. ELSEVIER, Biosensors and Bioelectronics**, v. 100, p. 533-540, 2018.

HUANG, Chun-Yueh. **Design and Implementation of Potentiostat with Standalone Signal Generator for Vanillylmandelic Acid Biosensors, Sensors and Materials**, v. 29, n. 6, p. 619-628, 2017.

SEGURA, B.; JIMÈNES, F. N; GIRALDO, L. R. **Potentiostat prototype with applications in electrochemical processes, Entre Ciencia e Ingeniería**, v. 10, n. 19, p. 61-69, 2016.

GIARDANO, Gabriela F., **Point-of-use electroanalytical platform based on homemade potentiostat and smartphone for multivariate data processing. Electrochimica Acta**, v. 219, p. 170-177, 2016.

DRYDEN, Michael D. M. Dryden, WHEELER, Aaron R. **DStat: A Versatile, Open-Source Potentiostat for Electroanalysis and Integration, PLOS ONE**, DOI:10.1371/journal.pone.0140349, out. 2015.

KELLNER, Karlheinz; POSNICEK, Thomas; ETTENAUER, Jörg; ZUSER, Karen; BRANDL, Martin. **A new, low-cost potentiostat for environmental measurements with an easy-to-use PC interface, ELSEVIER, Procedia Engineering** 120, p. 956-960, 2015.

SUN, Alexander; WAMBACH, Travis, A. G. Venkatesh; HALL, Drew A.; MONTERO, Patricio Espinoza; **A Low-Cost Smartphone-Based Electrochemical Biosensor for Point-of-Care Diagnostics, Department of Electrical and Computer Engineering, University of California, San Diego, La Jolla, CA, USA, IEEE Biomed Circuits Syst Conf.** Oct. 2014.

STEINBERG, Matthew D.; LOWE, Christopher R.; **A micropower amperometric potentiostat, ELSEVIER, Sensors and Actuators**, v. 97, p. 284-289, 2004.

RAMÍREZ, Tito Arévalo; TORRES, Claudia Castillo, ROSERO, Andrés Cela; **Low cost Potentiostat: Criteria and considerations for its design and construction, IEEE**, Feb.

2017.

HUANG Chun-Yueh; WANG Yu-Chien; CHEN Hung-Chieh; HO Kuo-Chuan. **DESIGN OF A PORTABLE POTENTIOSTAT FOR ELECTROCHEMICAL SENSORS**, ISSNIP 2004, v. 0-7803-8894-1 IEEE p. 331-336.

BLANCO J. R.; FERRERO F. J.; CAMPOS J.C.; ANTÒN J.C.; PINGARRÓN J. M.; REVIEIO A. J.; MANSO J.. **Design of a Low-Cost Portable Potentiostat for Amperometric Biosensors**, *Instrumentation and Measurement*, Sorrento, Italy p. 24-27, Abril 2006.

MARTÍNEZ, Esperanza García; DURÁ, Juan Manuel Herrero; FERNÁNDEZ, Raúl Simarro; **DESARROLLO DE UN CONTROLADOR PID INDUSTRIAL DE BAJO COSTE MEDIANTE RASPBERRY PI PARA CONTROL DE TEMPERATURA**, Universitat Politècnica de Valencia, 2015.

PIRI, Dániel; NAGV, Tamás; BARTA Veronika; BÁN, Dóra; BÁNYAI, László; BÓR, József; KIS, Árpád; KORONCZAY, Dávid; LEMPERGER, István; LICHTENBERGER, János; NOVÁK, Attila; SZALAI, Sándor; SZENDROI, Judit; SCRUCA, Eszter; WESZTERGOM, Viktor; **Raspberry Pi based Interactive Home Automation System through E-mail**, *International Conference on Reliability, Optimization and Information Technology*, ICROIT 2014, India, p. 6-8, Feb. 2014.

FUENTES, Luis Ortis. **Desarrollo de un potenciostato para la adquisición y tratamiento de la señal de biosensores enzimáticos**. Escuela Politecnica Superior, Universidade Automata de Madri. Oct. 2013.

PACHECO, W. F., *Revista Virtual de Química*, v. 5, p. 516-537, ago. 2013.

SKOOG, Douglas; WEST, Donald; HOLLER, James; CROUCH, Stanley, **Fundamentos de química analítica, Tradução de 8º edição norte-americana**, Editora THOMSON, 2006.

Electrochemistry – Application note n. 4: Potentiostat stability mystery explained; **BioLogic Science Instruments**, 2010.

Brett, A.M.O., and Brett, C.M.A. *Electroquímica: Princípios, Métodos e Aplicações*. Livraria Almedina, Coimbra, 1996.

CRUZ, Andres Felipe Diaz; NOREMA, Nicolas; KAUSHIK, Ajeet; BHANSALI, Shekhar. **A low-cost miniaturized potentiostat for point-of-care diagnosis**, *ELSEVIER, Biosensors and Bioelectronics*, 62, p. 249-254, 2014.

CAMPRODON, Guillem; GONZÁLEZ, Óscar ; BARBERAM, Víctor; PÉREZ, Máximo; SMÁRI, Viktor; HERAS, Miguel Ángel; BIZZOTTO, Alejandro. **Smart Citizen Kit and Station: An open environmental monitoring system for citizen participation and scientific experimentation**, *ELSEVIER, HardwareX*, 6, e00070, 2019.

LI, Fengqin; YU, Zhigang; HAN, Xianda; LAI, Rebecca. **Electrochemical aptamer-based sensors for food and water analysis:**

**A review, ELSEVIER, Analytica Chimica Acta 1051, p. 1-23, 2019.**

FLOREA, Anca; JONG, Mats; WAEL, Karolien. **Review Article Electrochemical strategies for the detection of forensic drugs, ELSEVIER, Current Opinion in Electrochemistry, 11, p. 34-40, 2018.**

KAUSHIK, jeet; YNDART, Adriana; JAYANT, Rahul Dev; SAGAR, Vidya; ATLURI, Venkata; BHANSALI, hekhar; NAIR, Madhavan. **Electrochemical sensing method for point-of-care cortisol detection in human immunodeficiency virus-infected patients, DOVEPRESS, International Journal of Nanomedicine, 10, p. 677–685, 2015.**

(Normas de acordo com a Revista ELSEVIER - Electrochimica Acta)

## **DESENVOLVIMENTO DE ALGORITMO PARA AMPERIMETRIA E VOLTAMETRIA CÍCLICA**

### **RESUMO**

O uso de microcomputador em equipamentos de medição é uma realidade à medida que os processadores evoluem, com o uso da rede de comunicação, acesso a hardwares e softwares com linguagens de alto nível. Foi implementado algoritmos para medições voltamétricas e amperométricas utilizando Raspberry Pi B+ e linguagem python, para aquisição de dados através de placa ads1115 como entrada analógica e mcp4725 como saída. O algoritmo se baseia na geração de ondas triangulares através da placa de saída analógica e aplicação de tensão em relação ao tempo e em ambos algoritmos há a leitura de corrente gerada através de aplicação de ondas. As placas possuem rede de comunicação de I2C e bibliotecas desenvolvidas em python. Já para a realização dos gráficos foram utilizados biblioteca Numpy, em razão do suporte a matrizes multidimensionais, biblioteca pyqtgraph devido suporte gráfico a computação científica e aplicações em tempo real e saída de dados em arquivo CSV, com exportação de dados para outros softwares estatísticos com Libre Office, openoffice, Origin entre outros e microcomputador Raspberry Pi B+ pelo hardware compatível com comunicação I2C e alto desempenho de processamento da função de medições voltamétricas e amperométricas.

**Palavras-chave:** Numpy, pyqtgraph, Raspberry, python, voltametria e amperometria.

### **ABSTRACT**

The microcomputers use in measurement equipment is a reality as the processors evolve with the use of the communication network, access to hardware and software with high level languages. There were implemented algorithms for voltametric and amperimetric measurements using Raspberry Pi B+ and python language, to acquire data through ads1115 plate as analog input and mcp4725 as output. The algorithm is based on the triangular waves generation through the analog output board and applying voltage in

relation to time. In both algorithms there is the current reading generated by applying waves. The boards have an I2C communication network and libraries developed in python. For the graphs realization there were used Numpy library, due to support multidimensional arrays, library pyqtgraph due to support scientific computation and real time applications and data output in .CSV file, with data export to other statistical software with Libre Office, Openoffice, Origin among others and microcomputer Raspberry Pi B+ due to hardware compatible with I2C communication and high performance of the function of voltametric and amperimetric measurements.

Keywords: Numpy, pyqtgraph, Raspberry, python, voltammetry and amperometry.

### **3.0 INTRODUÇÃO**

O algoritmo de voltametria se baseia na aplicação de ondas triangulares de tensão na solução química. Por outro lado, a amperometria fundamenta-se na injeção de tensão por determinado período de tempo em uma solução química. Ambos métodos aplicados a um potenciostato.

O potenciostato é um dispositivo utilizado para análise eletroquímica, que possui três eletrodos, um de trabalho, referência e auxiliar, no qual é inserida tensão entre o eletrodo de trabalho e referência, mensurada a corrente elétrica que flui no contra eletrodo ou eletrodo auxiliar (BIOLOGIC, 2010). Utilizado para sensoriamento ambiental, monitoramento de óxido reduções, qualidade de alimentos, testes farmacêuticos e medicinais.

Com a implementação de algoritmos para utilização em um potenciostato, é visto como sensor inteligente de acordo com norma IEEE 1451 que define sensor inteligente com dispositivo digital ou analógico ligado a interface de processamento de dados e armazenamento (BHUYAN, 2013)

A pesquisa teve como objetivo desenvolver algoritmos de amperometria e voltamétrica em linguagem de programação python. A partir disso foi realizada a configuração e a instalação de bibliotecas de placas de comunicação, gráficos científicos e vetores multidimensionais. Desse modo, foi analisado a eficácia da linguagem para a aplicação em um potenciostato.

### 3.1 EXPERIMENTO

A utilização das placas I2Cs com microcomputador Raspberry, para medições voltamétricas e amperométricas, foi realizada através da utilização da placa ADS1115 e MCP4725. A placa MCP4725 é utilizada para scanear o potencial na forma triangular, método típico da voltametria cíclica através de um loop de injeção de tensão. A Figura 1 representa um pulso típico gerado na técnica voltametria cíclica.

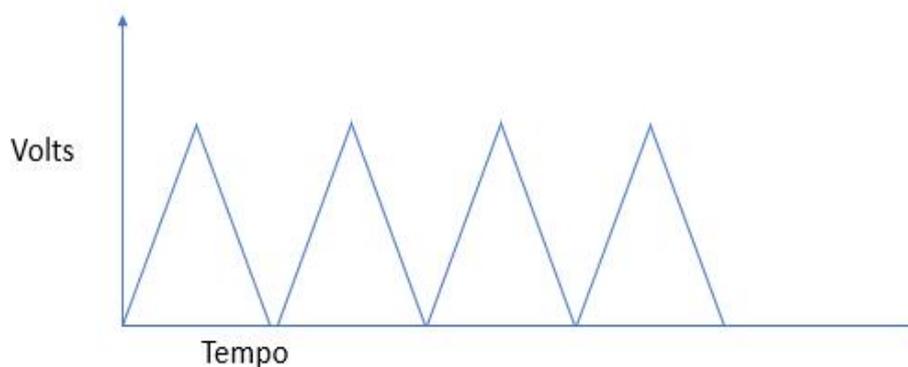


Figura 11 – Geração de forma de onda triangular.

A placa MCP4725 tem resolução de 12bits (MARTÍNEZ, 2015). Logo  $2^{12} = 4096$  com variação de 0 a 3.3v, na placa eletrônica do potenciostato é feito a calibração através de fonte simétrica e amplificadores operacionais, para range de -1.65 a + 1.65v.

Segue fluxograma de geração de onda triangular, valor correspondente a voltagem que será incrementada e decrementada de acordo com algoritmo

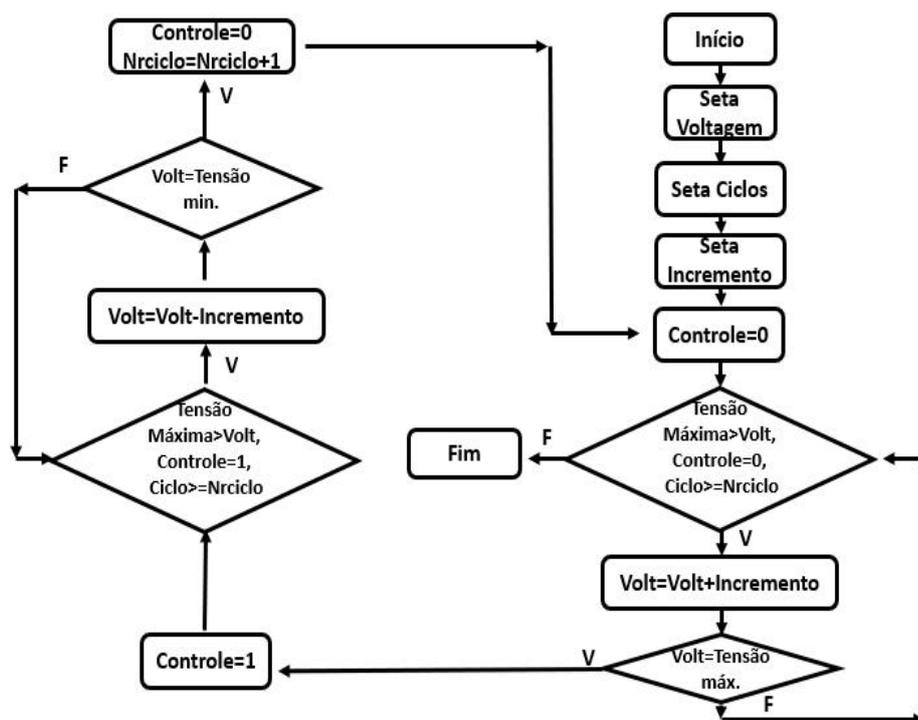


Figura 12 – Fluxograma de geração de onda triangular.

A leitura de corrente gerada através da placa ADS1115 com resolução de 16 bits, com 4 canais de entrada analógica com até 860 medições por segundo em rede I2C com amplificador interno de 16 vezes (PIRI, 2014).

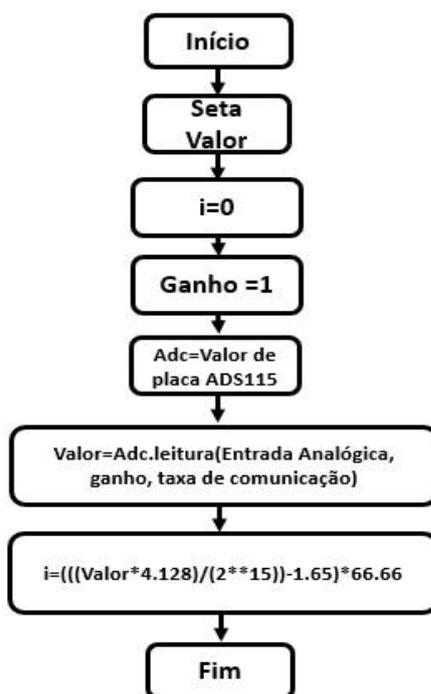


Figura 13 – Fluxograma leitura de corrente.

Já o método da amperometria que é aplicado tensão por determinado período de tempo, no método foi utilizado o conceito computacional de programação *thread*, em que de forma concorrente é utilizado no sistema operacional e núcleos do processador, visto processamento quad-core do Raspberry Pi B+.

Um *thread* é iniciado para fazer os ciclos de varredura, limitados em 10 tempos e 10 tensões. Vale ressaltar que potenciostatos comerciais usualmente usam 5 tempos e 5 tensões. A Figura 12 representa um pulso gerado durante uma análise de amperometria de múltiplos pulsos.

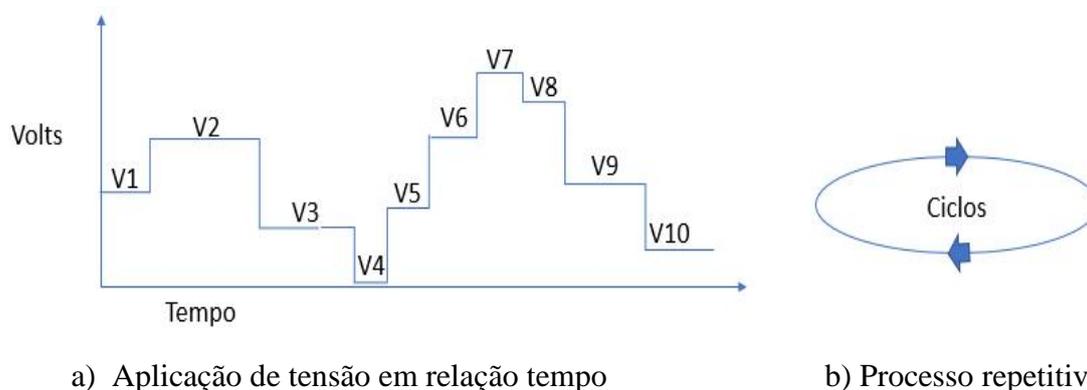


Figura 14 – Geração de sinal para amperometria.

A eficácia do uso de *thread* foi vista através de testes de software com leitura em tempo real, conforme teste abaixo, comprovando tempo mínimo de 50ms.

```
print('.....Setting voltage 3.....')
incremental1() # terceira injeção de tensão
print "LOCAL====3:", local1
if tempo3!=0:
    antes = time.time() # retorna números de segundos após início
    dac2.set_voltage(int(volts3)) # seta voltagem
    time.sleep(float(tempo3)) #aguarda tempo determinado aplicando tensão
    depois = time.time() # pega tempo de ciclo de raspberry
    pegacorrente() # função para ler corrente elétrica
    time.sleep(0.005) #aguarda 0.005s
    print(depois-antes) # mostra tempo na tela para conferir com tempo de injeção
```

O fluxo de dados do potenciostato é apresentado na figura abaixo:

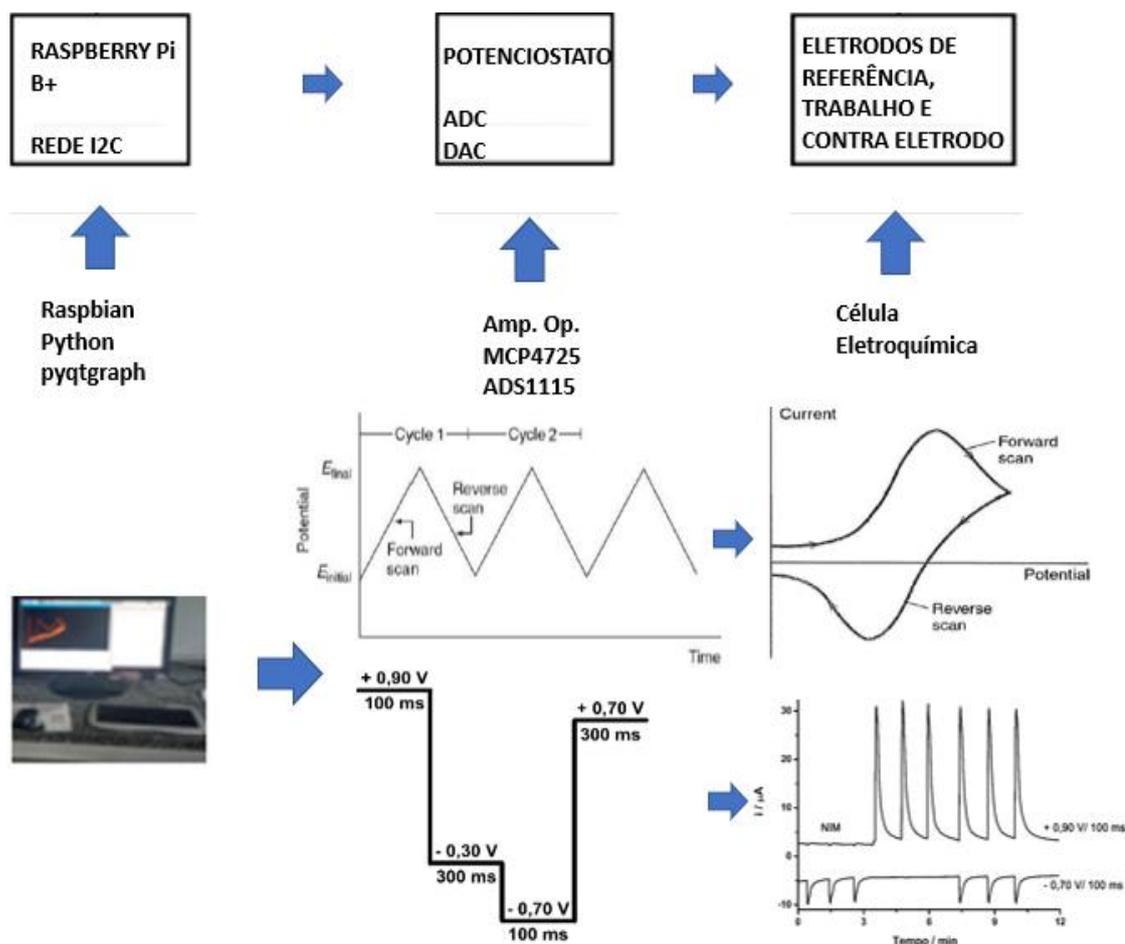


Figura 15 – Fluxo de dados do potenciostato.

### 3.2 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O uso de placas ADS1115 e MCP4725 para algoritmos de amperometria e voltametria teve resultados satisfatórios, pois o uso de redes de comunicação é uma maneira de minimizar ruídos, oriundos dos componentes eletrônicos, com dados assertivos e tempo de resposta dentro do esperado, aliada a linguagem de programação de alto nível python e sistema operacional Raspbian. Vale ressaltar a utilização de biblioteca gráfica pyqtgraph, preparada para cálculos matemáticos intensos e juntamente com biblioteca Numpy, que possuem sintaxe semelhante ao software proprietário Matlab. Deste modo, a biblioteca Numpy já é preparada para o processamento de vetores e matrizes multidimensionais.

A Figura 16 representa o teste em laboratório utilizando o método de voltametria cíclica, com análise de dados colhidos e exportados para planilha eletrônica, as medições apresentaram dados coerentes com consumo maior de corrente à medida que a

porcentagem de etanol na solução é incrementada na solução. Nesse ensaio foram inseridos varredura de -0,3 a 1,2v e incremento de 0.005v. Vista oxidação do etanol ocorre com tensão de 0.18V (PEREIRA, 2012), o potenciostato apresentou oxidação do etanol em 0.15V obtendo um resultado satisfatório visto dispositivo *homemade*.

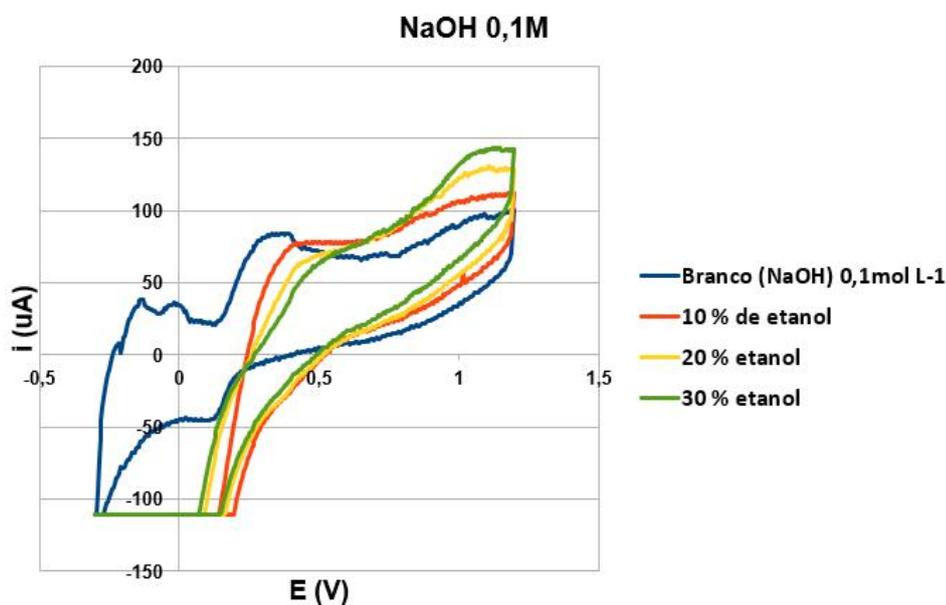


Figura 16 – Teste de voltametria cíclica para concentrações crescentes de etanol em meio de NaOH 0,1M e eletrodo de ouro.

A Figura 17 apresenta os Testes de laboratório aplicando o método de amperometria de múltiplos pulsos.

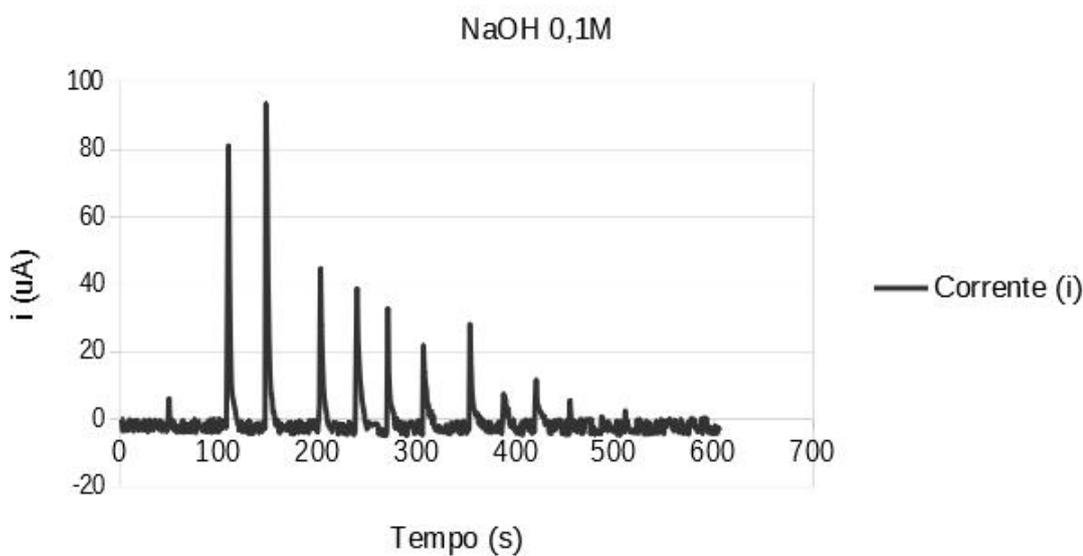


Figura 17 – Teste de amperometria de múltiplos pulsos utilizando NaOH 0,1M.

Nesse ensaio foram feitas injeções de concentrações decrescentes de padrões de etanol (40, 20, 10, 5 e 2.5%) em meio de NaOH 0,1mol L<sup>-1</sup> como eletrólito suporte e ouro como eletrodo de trabalho. É possível observar que a corrente obtida foi proporcional a concentração injetada, sendo os dois primeiros houve a injeção de etanol a 40%, o terceiro, quarto e quinto pico realizou-se injeção de etanol em concentração de 20%, o sexto e sétimo pico injeção de etanol a 10%, oitavo e nono pico injeção de etanol 5% e décimo e décimo primeiro pico injeção de etanol 2,5%. No teste foi aplicado o pulso de potencial 0.2V em 100ms.

### 3.3 CONCLUSÃO

O uso do Raspberry Pi B+ para algoritmos de amperometria e voltametria, aliados ao sistema operacional Raspbian e bibliotecas pyqtgraph e Numpy, possibilitou desenvolver algoritmos eficazes para testes eletroquímicos de baixo custo. Em testes de velocidades na amperometria o tempo de varredura do algoritmo, correspondeu assertivamente nos testes de softwares, visto a utilização de função de tempo de processamento em python.

Como dificuldade vale ressaltar a instalação e configuração de placas de comunicação em sistema, testes de software para verificar o tempo de injeção de tensão por determinado período de tempo e a manipulação de vetores em linguagem de programação.

A linguagem de programação python por ser interpretada, geralmente é considerada lenta, porém nos testes com voltametria e amperometria e literaturas científicas foram utilizados a linguagem de programação com robustez a agilidade.

O tempo de desenvolvimento em linguagem python foi rápido, pois se assemelha as principais linguagens de programação, e possui grande comunidade de desenvolvedores.

Como trabalho futuro há possibilidade de implementação de algoritmos de aprendizagem, para melhor análises dos resultados obtidos.

## Referências Bibliográficas

DRYDEN, Michael D. M. Dryden, WHEELER, Aaron R. **DStat: A Versatile, Open-Source Potentiostat for Electroanalysis and Integration**, PLOS ONE, DOI:10.1371/journal.pone.0140349, out. 2015.

MARTÍNEZ, Esperanza García; DURÁ, Juan Manuel Herrero; FERNÁNDEZ, Raúl Simarro; **DESARROLLO DE UN CONTROLADOR PID INDUSTRIAL DE BAJO COSTE MEDIANTE RASPBERRY PI PARA CONTROL DE TEMPERATURA**, Universitat Politècnica de Valencia, 2015.

PIRI, Dániel; NAGV, Tamás; BARTA Veronika; BÁN, Dóra; BÁNYAI, László; BÓR, József; KIS, Árpád; KORONCZAY, Dávid; LEMPERGER, István; LICHTENBERGER, János; NOVÁK, Attila; SZALAI, Sándor; SZENDROI, Judit; SCRUCA, Eszter; WESZTERGOM, Viktor; **Raspberry Pi based Interactive Home Automation System through E-mail**, International Conference on Reliability, Optimization and Information Technology, ICROIT 2014, India, p. 6-8, Feb. 2014.

Electrochemistry – Application note n. 4: Potentiostat stability mystery explained; **BioLogic Science Instruments**, 2010.

BHUYAN, Manabendra. **Instrumentação Inteligente: princípios e aplicações**; Tradução e revisão técnica Sérgio Gilberto Taboada, 1. Ed. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2013.

PEREIRA, Polyana F., MARRA, Mariana C., MUNOZ, Rodrigo A.A., RICHTER, Eduardo M., **Fast batch injection analysis system for on-site determination of ethanol in gasohol and fuel ethanol**, Talanta, v.90, feb. 2012, p.99-102

(Normas de acordo com a Revista ELSEVIER - Biosensor e Bioelectronics)

## **CRITÉRIOS USADOS PARA DESENVOLVIMENTO DE MINIPOTENCIOSTATO USANDO RASPBERRY PI**

### **RESUMO**

O potenciostato é um dispositivo que permite o estudo de reações de oxido-reduções na eletroquímica, com análise quantitativa e qualitativa de soluções químicas, sendo aplicado em diferentes áreas de conhecimento, como monitoramento ambiental, farmacêutica, medicina, combustíveis fosseis e detectores de gás. A pesquisa teve como base o potenciostato com três eletrodos: eletrodo de trabalho (WE), referência (RE) e auxiliar (CE). O dispositivo desenvolvido tem alta sensibilidade, com análises em tempo real e dados confiáveis, visualizados através da biblioteca gráfica pyqtgraph e desenvolvido em linguagem python. Os dados resultantes da análise eletroquímica podem ser salvos em diferentes formatos e exportados para plataformas estatísticas e gráficas .png .jpg .tiff .csv e matplotlib. A partir do sistema operacional Raspbian para Raspberry Pi B+ foi utilizado o software de planilha eletrônica Calc do pacote de LibreOffice, no menu de produtividade do Raspbian, como ferramenta estatística para a visualização da análise gráfica dos resultados obtidos da análise eletroquímica. E a utilização de placas de comunicação em rede I2C para gerar formatos de onda e leitura de corrente elétrica com resoluções de 12 e 16 bits.

**Palavras-chave:** Potenciostato, Raspberry, python, voltametria e amperometria.

### **ABSTRACT**

Potentiostat is a device that allows the study of oxidation-reduction reactions in electrochemistry, with the quantitative and qualitative analysis of resources, being applied in different areas of knowledge, such as environmental monitoring, pharmaceuticals, medicine, substances and gas detectors. A research was based on the potential with three electrodes: working electrode (WE), reference (RE) and auxiliary (CE). The developed

file has high sensitivity, with real-time analysis and reliable data, is visualized through the graphical library pyqtgraph and developed in python language. Electrochemical analysis data can be saved in different formats and exported to .png .jpg .tiff .csv and matplotlib graphic platforms. From the Raspbian operating system to Raspberry there were used the spreadsheet software, such as a Raspbian productivity menu, as a graph to visualize the result graphical image of the electrochemical analysis. And the use of I2C network communication cards to generate waveforms and read their functions with 12 and 16 bits.

Keywords: Potentiostat, Raspberry, python, voltammetry and amperometry.

## **4.0 INTRODUÇÃO**

O potenciostato é um dispositivo utilizado para análise eletroquímica, que possui três eletrodos: trabalho, referência e auxiliar, no qual é inserida tensão entre o eletrodo de trabalho e referência, mensurada a corrente elétrica que flui no contraeletrodo ou eletrodo auxiliar (BIOLOGIC, 2010). Utilizado para sensoriamento ambiental, monitoramento de óxido reduções, qualidade de alimentos, testes farmacêuticos e medicinais.

Diante literatura e pesquisa bibliográfica foram adotados critérios para o desenvolvimento do potenciostato. Dados salvos em .csv e .png (KELLNER, 2015), utilização de conversor analógico digital ADS1115 com resolução de 16 bits para medição de corrente elétrica utilizando rede I2C (FUENTES, 2013) e utilização de filtros ativos (RAMIREZ, 2017).

O desenvolvimento do potenciostato se justifica porque sua utilização destaca os pontos a seguir: variação de até dez tensões em relação ao tempo no método da amperometria de múltiplos pulsos; os capacitores através de ligação em placa eletrônica, têm como utilidade a redução de ruídos oriundos de outros componentes; a utilização de programação concorrente para geração de ondas e aquisição de dados em tempo real; a utilização de softwares livres no desenvolvimento de placa eletrônica; e algoritmos em linguagem de programação livre python. Desse modo, a pesquisa pode apresentar diferentes aplicabilidades em áreas diversas e com o custo reduzido em relação a potenciostatos comerciais.

A pesquisa teve como objetivo adotar critérios para o desenvolvimento de um potenciostato *homemade* com a possibilidade de análises utilizando as técnicas de amperometria de múltiplos pulsos e voltamétrica cíclica.

#### 4.1 EXPERIMENTO

Nesta pesquisa foi desenvolvido um potenciostato com aplicação de tensão na faixa de de -1.66 a 1.66v e leitura de corrente de 100 $\mu$ A com a finalidade de manter estabilidade de medições, reduzindo ruídos eletrônicos, a fim de manter a confiabilidades dos dados gerados em dispositivo de fácil acesso e com interface com o usuário.

Em levantamento bibliográfico constatou-se a utilização de amplificador operacional OP77 para montagem do circuito eletrônico e a utilização de dispositivos de rede I2C para gerar ondas e obter leitura de corrente elétrica, com principais características baixo *offset* e ganho de modo diferencial de 10 milhões (ANGEL, 2014). Ambos foram utilizados para a construção do potenciostato proposto.

Foram utilizadas placa MCP4725 com saída analógica para geração de formatos de onda, placa ADS1115 como entrada analógica de tensão e amplificadores operacionais OP77. O fluxo de dados do potenciostato é realizado com microcomputador Raspberry Pi B+, sistema operacional Raspbian, com linguagem de programação python e biblioteca gráfica pyqtgraph.

Para comprovar a eficácia da geração das tensões no método da amperometria foi utilizado osciloscópio Tektronic TBS1052B devido velocidade de ciclos. O teste da placa do potenciostato se baseou em uma célula eletrolítica fictícia *dummy-cell* para simular uma célula eletroquímica, com aumento de variações causada pelo efeito capacitivo, conforme Figura 16.

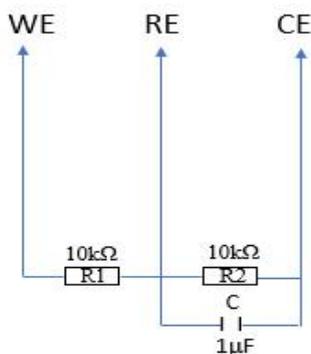


Figura 18 – Disposição de resistores e capacitor – dummy cell.

## 4.2 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Figura 19 representa o esquema de circuito eletrônico do potenciostato desenvolvido.

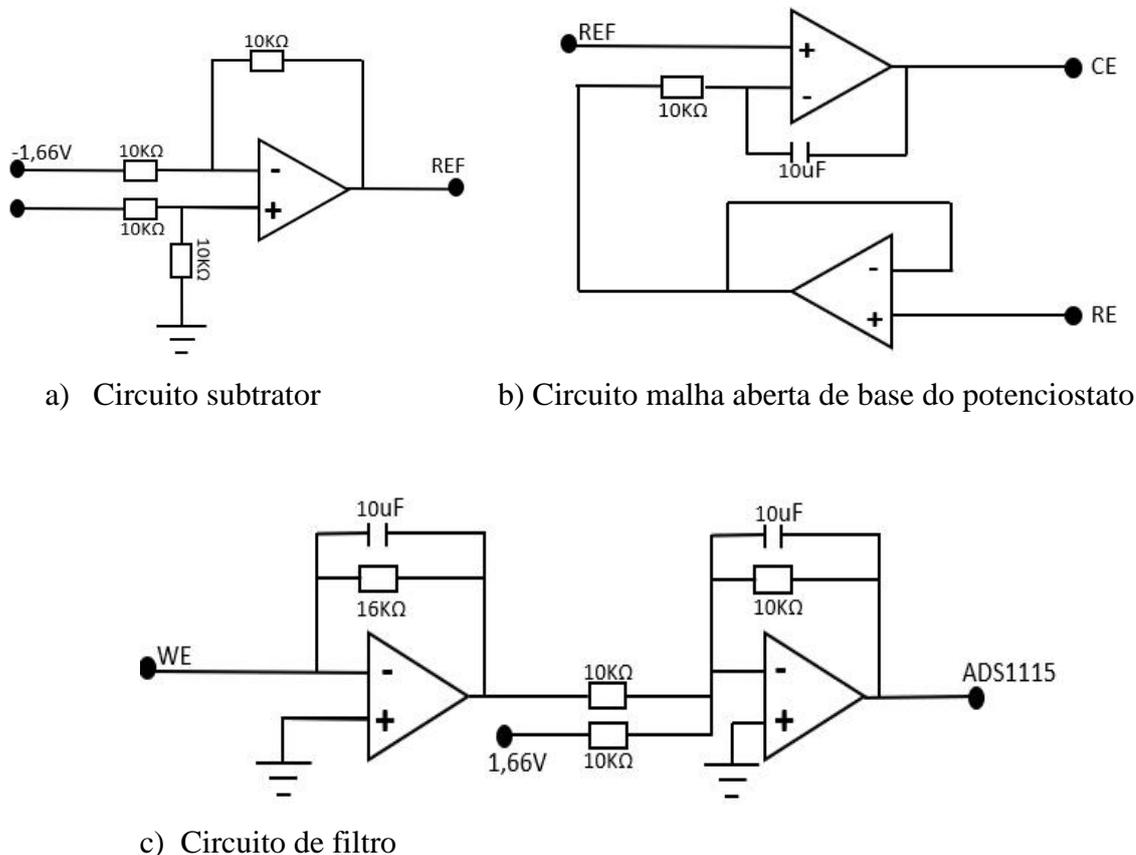


Figura 19 – Circuito eletrônico do potenciostato

O circuito (a) é um subtrator, usado para enquadrar tensão de referência na faixa de  $-1,66\text{ V}$  a  $+1,66\text{ V}$ , para uma variação de tensão de entrada de  $0$  a  $3,3\text{ V}$ , respectivamente. O esquema (b) representa o circuito de realimentação da tensão de referência. Neste circuito o amplificador em malha aberta, normalmente utilizados em potenciostatos, foi substituído por amplificador integrador, com propósito de reduzir ruídos eletrônicos.

O circuito (c) é constituído de dois amplificadores operacionais ligados como filtros, com resistor a capacitor em paralelo, porém no amplificador ligado ao ADS115 houve um ajuste do  $0\text{ V}$  para que  $-1,66\text{ V}$  correspondesse a  $0\text{ V}$  na entrada analógica e  $+1,66$  a  $3.3\text{ V}$  na entrada do conversor analógico digital.

A placa MCP4725 para geração de ondas tem resolução de 12 bits, foi escolhida com variação de 0 a 3.3v (MARTÍNEZ, 2015). Já a placa ADS1115 foi escolhida como leitura de corrente na placa eletrônica do potenciostato.

Na Figura 20 é observada a imagem do potenciostato desenvolvido com interface I2C de placas de geração de sinal (MCP4725) e leitura (ADS1115) ambas com comunicação com Raspberry.

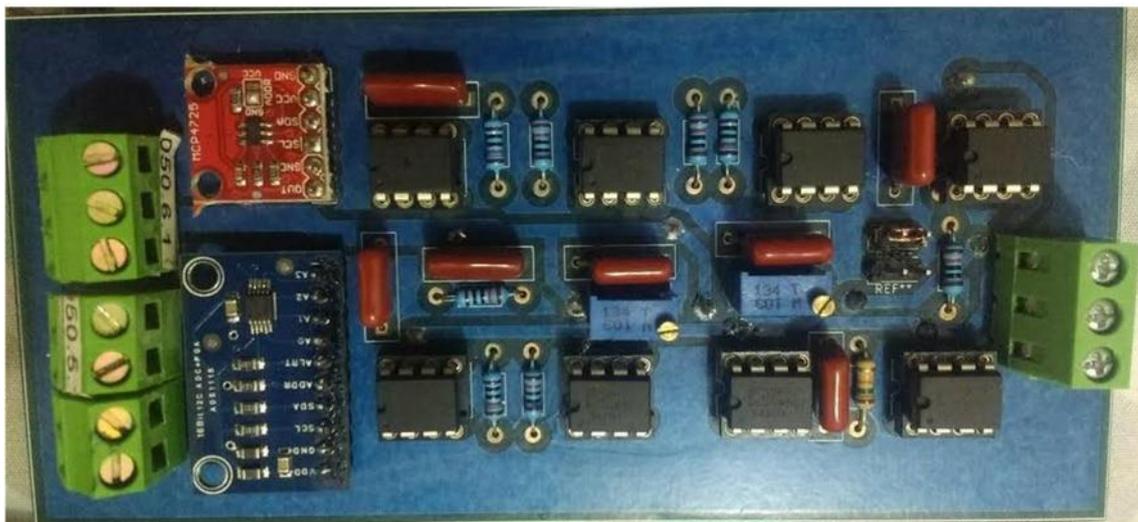


Figura 20 – Imagem do Potenciostato desenvolvido.

Para comprovar geração de sinais no método de amperometria de múltiplos pulsos, os seguintes pulsos de potenciais foram selecionados:  $+0.18\text{ V}/100\text{ms}$ ,  $+0.70\text{ V}/300\text{ms}$  e  $-0.25\text{ V}/300\text{ms}$  conforme (PEREIRA, 2012). De acordo com a Figura 4, com análise em osciloscópio foi verificado utilização dos efeitos dos capacitores atenuando o sinal gerado usados como filtro, logo diminuindo ruído que podem causar medições errôneas.

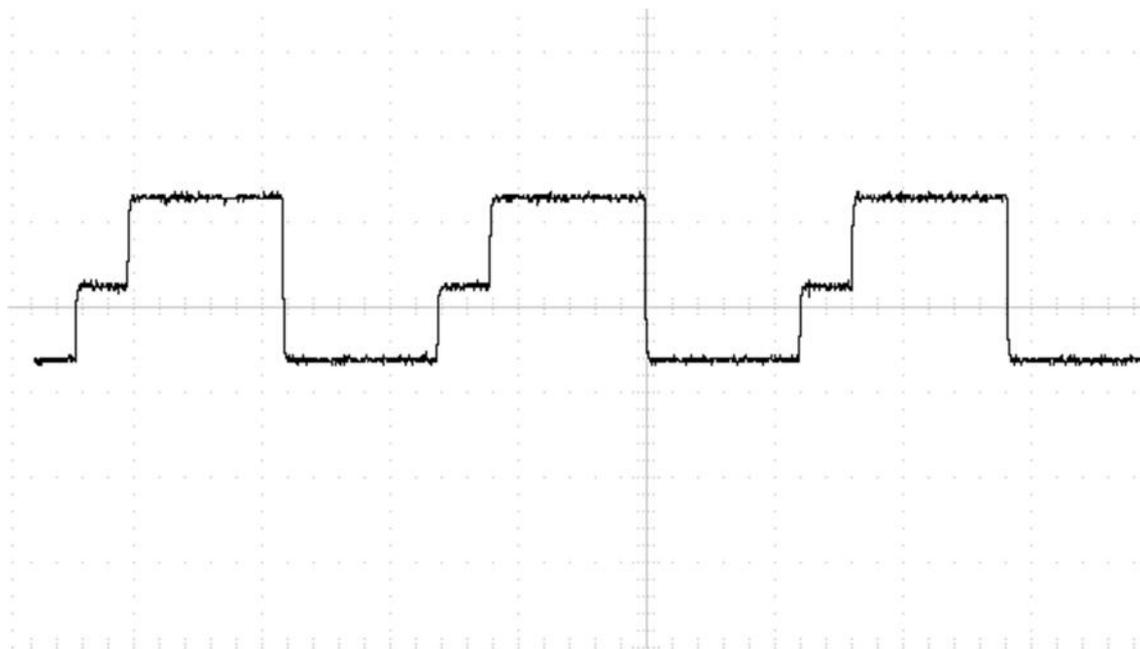


Figura 21 – Sinal gerado no método da amperometria de múltiplos pulsos. Pulsos de potenciais aplicados 500 mv/div. e na horizontal 250ms/div.: +0.18 V/100ms, +0.70 V/300ms e -0.25 V/300ms.

Em análise dos dados obtidos do gráfico de geração do sinal, há compatibilidade 500 mv/div. e na horizontal 250ms/div. com ciclos informados ao software +0.18 V/100 ms, +0.70 V/300 ms e -0.25 V/300 ms. A leitura de corrente ocorreu através da placa ADS1115, com resolução de 16 bits, com 4 canais de entrada analógica, com até 860 medições por segundo em rede I2C e com amplificador interno de 16 vezes (PIRI, 2014). A utilização de osciloscópio foi essencial para comprovação do funcionamento da eletrônica aliada ao software, e ciclos de tensões em curto espaço de tempo no método da amperometria.

No potenciostato desenvolvido há possibilidade de entrar com até 10 medidas de tensão e tempo, com utilização de programação paralela em que são observadas a geração do sinal e leitura em tempo real. Na Figura 22, observa-se a tela para inserção de tensões e tempos, utilizando no método eletroquímico de amperometria de múltiplos pulsos.

```

Python 2.7.13 Shell
File Edit Shell Debug Options Window Help
[GCC 6.3.0 20170124] on linux2
Type "copyright", "credits" or "license()" for more information.
>>>
----- RESTART: /home/pi/AMPEROMETRIA_17_05_19.py -----
Entre em 10 medidas tensao e tempo (s)
Entre tensao de V1:0.18
Entre tempo de T1:0.1
Ver Grafico s/n:s
s
Na placa V1: 2267.62162162
0.1
Entre tensao de V2:0.7
Entre tempo de T2:0.3
Ver Grafico s/n:n
n
Na placa V2: 2907.66166166
0.3
Entre tensao de V3:-0.25
Entre tempo de T3:0.3
Ver Grafico s/n:n
n
Na placa V3: 1738.19219219
0.3
Entre tensao de V4:0
Entre tempo de T4:0
Ver Grafico s/n:n
n
Na placa V4: 2946.0
0.0
Entre tensao de V5:0
Entre tempo de T5:0
Ver Grafico s/n:n
n
2046.0
0.0
Entre tensao de V6:0
Entre tempo de T6:0
Ver Grafico s/n:n
n
Na placa V6: 2946.0

```

Figura 22 – Entrada de dados em método da amperometria de múltiplos pulsos.

A geração do sinal elétrico para a método da voltametria cíclica é vista na forma de varredura em determinado potencial na forma triangular. A Figura 23 representa a varredura de potencial de - 0,2 a +1,2V em relação ao tempo (ms).

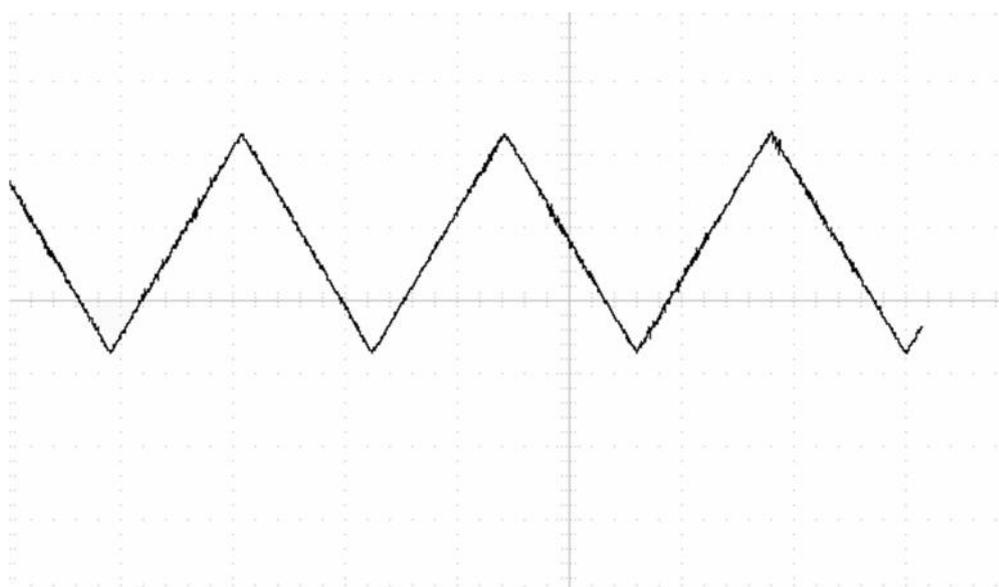
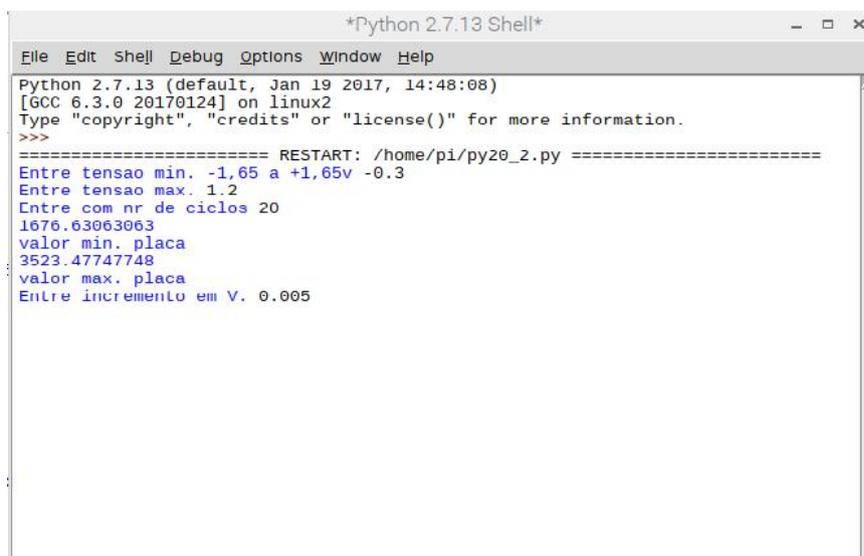


Figura 23 – Sinal gerado para voltametria cíclica. Faixa de potencial: -0,2 a +1,2 V,

500 mv/div. e na horizontal 250ms/div.

A Figura 24 representa a tela para entrada de dados para método da voltametria cíclica, que é utilizado formato de onda triangular. Com a resolução da placa MPC4725 de 12 bits foi possível alcançar precisão de 0,8mV por ciclo do programa.



```

Python 2.7.13 Shell*
File Edit Shell Debug Options Window Help
Python 2.7.13 (default, Jan 19 2017, 14:48:08)
[GCC 6.3.0 20170124] on linux2
Type "copyright", "credits" or "license()" for more information.
>>>
===== RESTART: /home/pi/py20_2.py =====
Entre tensao min. -1,65 a +1,65v -0.3
Entre tensao max. 1.2
Entre com nr de ciclos 20
1676.63063063
valor min. placa
3523.47747748
valor max. placa
Entre incremento em V. 0.005

```

Figura 24 – Entrada de dados no método da Voltametria Cíclica.

A utilização de placas ADS1115 e MCP4725 para algoritmos de amperometria e voltametria teve resultados satisfatórios, pois o uso de redes de comunicação é uma maneira de minimizar ruídos, oriundos dos componentes eletrônicos, com dados assertivos e tempo de resposta dentro do esperado, aliada a linguagem de programação de alto nível python e sistema operacional Raspbian. Vale ressaltar a utilização de biblioteca gráfica pyqtgraph, preparada para cálculos matemáticos intensos e juntamente com biblioteca Numpy, que possuem sintaxe semelhante ao software proprietário Matlab. Deste modo, a biblioteca Numpy já é preparada para o processamento de vetores e matrizes multidimensionais.

### 4.3 CONCLUSÃO

O uso do Raspberry Pi 3 B+ como controlador de potenciostato da maior flexibilidade no desenvolvimento do software, pois há suportes as principais linguagens de programação. A opção do uso do amplificador OP77 foi de grande valia pois

apresentou resultados satisfatórios, relativos a ganhos de até 10 milhões de vezes, alta impedância de entrada, alta velocidade de resposta (ANGEL, 2014).

A utilização de rede nativa I2C do Raspberry apresentou respostas coerentes a realização chegando a 860 medições por segundo. Podendo ser expandida com adição de mais dispositivos de medição e desenvolvimento de mais pontos de medições.

A utilização de filtros com resistores e capacitores (10 $\mu$ F), com visto em literaturas, deu estabilidade ao sistema de medição (FUENTES, 2013).

A eficácia do potenciostato está diretamente ligada a resolução das placas de entrada e saída analógicas, 12 bits e 16 bits respectivamente.

Funções de visualização dos dados foram retiradas do software, como escrita em terminal de programação para melhorar performance de processamento das informações geradas.

## Referências Bibliográficas

KELLNER, Karlheinz; POSNICEK, Thomas; ETTENAUER, Jörg; ZUSER, Karen; BRANDL, Martin. **A new, low-cost potentiostat for environmental measurements with an easy-to-use PC interface**, ELSEVIER, Procedia Engineering 120, p. 956-960, 2015.

RAMÍREZ, Tito Arévalo; TORRES, Claudia Castillo, ROSERO, Andrés Cela; **Low cost Potentiostat: Criteria and considerations for its design and construction**, IEEE, Feb. 2017.

MARTÍNEZ, Esperanza García; DURÁ, Juan Manuel Herrero; FERNÁNDEZ, Raúl Simarro; **DESARROLLO DE UN CONTROLADOR PID INDUSTRIAL DE BAJO COSTE MEDIANTE RASPBERRY PI PARA CONTROL DE TEMPERATURA**, Universitat Politècnica de Valencia, 2015.

PIRI, Dániel; NAGV, Tamás; BARTA Veronika; BÁN, Dóra; BÁNYAI, László; BÓR, József; KIS, Árpád; KORONCZAY, Dávid; LEMPERGER, István; LICHTENBERGER, János; NOVÁK, Attila; SZALAI, Sándor; SZENDROI, Judit; SCRUCA, Eszter; WESZTERGOM, Viktor; **Raspberry Pi based Interactive Home Automation System through E-mail**, International Conference on Reliability, Optimization and Information Technology, ICROIT 2014, India, p. 6-8, Feb. 2014.

FUENTES, Luis Ortis. **Desarrollo de un potenciostato para la adquisición y tratamiento de la señal de biosensores enzimáticos**. Escuela Politecnica Superior, Universidade Automata de Madri. Oct. 2013.

PEREIRA, Polyana F., MARRA, Mariana C., MUNOZ, Rodrigo A.A., RICHTER, Eduardo M., **Fast batch injection analysis system for on-site determination of ethanol in gasohol and fuel ethanol**, Talanta, v.90, fev. 2012, p.99-102

ANGEL, Arrieta Almario Álvaro, LILIANA, Tarazona-Cáceres Rosa, **Sistema multipotenciostato basado en instrumentación virtual**, Ingeniería Investigación y Tecnología, volumen XV (número 3), setembro 2014: 321-337

SUN, Alexander; WAMBACH, Travis, A. G. Venkatesh; HALL, Drew A.; MONTERO, Patricio Espinoza; **A Low-Cost Smartphone-Based Electrochemical Biosensor for Point-of-Care Diagnostics**, Department of Electrical and Computer Engineering, University of California, San Diego, La Jolla, CA, USA, IEEE Biomed Circuits Syst Conf. Oct. 2014.

### Projetos futuros

Como projeto futuro o potenciostato poderá ser aplicado em diferentes áreas, como mostra a seguir: medições de umidade e gases; mudança de layout do software para aplicação web; acesso remoto aos dados em Raspberry; envio de mensagens automáticas; testes sanguíneos; monitoramentos ambientais; utilização de biblioteca gráfica para gráficos 3d; e utilização de inteligência artificial ao software.





