



Universidade Federal de Ouro Preto - UFOP
Escola de Minas
Colegiado do curso de Engenharia de
Controle e Automação - CECAU



Guilherme Brito Rodrigues

Desenvolvimento de um amostrador automático para a técnica de ionização por Paper Spray

Monografia de Graduação em Engenharia de Controle e Automação

Ouro Preto, 2018

Guilherme Brito Rodrigues

Desenvolvimento de um amostrador automático para a técnica de ionização por Paper Spray

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Controle e Automação da Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para a obtenção do Grau de Engenheiro de Controle e Automação.

Orientador: Prof. Dr. Alan Kardek Rêgo Segundo

Ouro Preto, 2018

R685d Rodrigues, Guilherme Brito.
Desenvolvimento de um amostrador automático para a técnica de ionização
por paper spray [manuscrito] / Guilherme Brito Rodrigues. - 2018.

47f.:

Orientador: Prof. Dr. Alan Kardek Rêgo Segundo.

Monografia (Graduação). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de
Minas. Departamento de Engenharia de Controle e Automação e Técnicas
Fundamentais.

1. Sistemas embarcados. 2. Espectrometria de massa. 3. Laboratórios -
Automação . 4. Ionização. I. Segundo, Alan Kardek Rêgo . II. Universidade
Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU: 621.3

Catálogo: ficha@sisbin.ufop.br

Monografia defendida e aprovada, em 22 de fevereiro de 2018, pela comissão avaliadora constituída pelos professores:

A large, stylized handwritten signature in blue ink, consisting of several loops and a long horizontal stroke at the end.

Prof. Dr. Alan Kardek Rêgo Segundo – Orientador

A handwritten signature in blue ink, featuring a large, stylized 'A' followed by a horizontal stroke.

Prof. Dr. José Alberto Naves Cocota Júnior – Professor Convidado

A handwritten signature in blue ink, appearing as a series of connected loops and a final horizontal stroke.

Prof. Dr. Paulo Marcos de Barros Monteiro – Professor Convidado

Resumo

Nos últimos anos, tornou-se comum em nossa sociedade a necessidade de processos automatizados. Diante disso, a automatização é de grande valia em inúmeros processos, inclusive na execução de experimentos em práticas laboratoriais. O caso estudado visa o desenvolvimento de um projeto, de baixo custo, de um sistema embarcado que será acoplado a um espectrômetro de massas com objetivo de reduzir significativamente o tempo necessário para montagem do ensaio para a técnica de ionização por *paper spray*, possibilitando a análise de diferentes amostras por meio de uma interface gráfica amigável.

Palavras-chaves: Sistemas embarcados, Espectrometria de massas, Automação laboratorial, Ionização por paper spray.

Abstract

In the last years, the need for automated processes has become common in our society. Therefore, automation is of great value in many processes, including the execution of experiments in laboratory practices. The case study aims at the development of a low cost project of an embedded system that will be coupled to a mass spectrometer with the objective of significantly reducing the time required for the setting of the paper spray ionization technique, allowing the analysis of different samples through a user friendly interface.

Keywords: Embedded systems, Mass spectrometry, Laboratorial automation, Paper spray ionization.

Lista de ilustrações

Figura 1	Esquema de funcionamento de um espectrômetro de massas.	11
Figura 2	Esquema de ionização <i>paper spray</i> por um espectrômetro de massas. . .	12
Figura 3	Esquema de análise rápida ionização <i>paper spray</i>	12
Figura 4	Disposição da pinagem do PIC18F2550.	14
Figura 5	Diagrama de blocos PIC18F2550.	15
Figura 6	<i>Duty Cycle</i> do PWM.	16
Figura 7	Componentes de um Servo Motor.	18
Figura 8	Sinais de controle de um Servo Motor.	19
Figura 9	Ligação das bobinas de motor de passo unipolar com 5 conexões. . . .	20
Figura 10	Chip ULN2003.	21
Figura 11	Montagem de uma fonte de ionização por <i>paper spray</i> no LaCEM. . . .	23
Figura 12	Velox 360, fonte comercial para a técnica de ionização por paper spray. .	24
Figura 13	Desenho esquemático de um cartucho de amostras.	25
Figura 14	Desenho do trilho para empilhamento de cartuchos de amostra.	25
Figura 15	Desenho do acoplamento entre a mesa giratória e o dispenser de cartuchos. .	26
Figura 16	Montagem do amostrador automático sem os atuadores.	26
Figura 17	Montagem do cartucho.	27
Figura 18	Mesa Giratória.	27
Figura 19	Base Móvel.	28
Figura 20	Trilho Acoplado na Base Móvel.	28
Figura 21	Base móvel apresentando liberdade de movimento no eixo X.	29
Figura 22	Contato elétrico entre cartucho e fonte de alta tensão.	29
Figura 23	Sistema de abertura do dispenser de cartuchos.	30
Figura 24	Automação do Dispenser.	31
Figura 25	Motor de passo com eixo interligado à mesa giratória	31
Figura 26	Esquemático do projeto eletrônico.	32
Figura 27	<i>Layout</i> da PCI.	33
Figura 28	Visualização 3D da PCI.	34
Figura 29	Placa de circuito impresso desenvolvida.	34
Figura 30	Tela principal Interface Gráfica	36
Figura 31	Tela da Interface Gráfica que apresenta os estados do sistema.	37
Figura 32	Fluxograma Firmware do Microcontrolador.	38

Figura 33	Montagem final do amostrador automático.	40
Figura 34	Fixação da PCI	41
Figura 35	Vista de encaixe no espectrômetro.	41

Sumário

1	Introdução	8
1.1	Justificativas e Relevância	8
1.2	Metodologia	9
1.3	Objetivos Gerais	9
1.4	Objetivos Específicos	9
2	Fundamentação Teórica	10
2.1	Espectrometria de Massas	10
2.2	Ionização por Paper Spray acoplada a Espectrometria de Massas	11
2.3	Microcontrolador	13
2.3.1	Microcontrolador PIC	13
2.3.2	PIC18F2550	14
2.3.3	Módulo CCP (<i>PWM</i>)	15
2.3.4	Comunicação USB	17
2.4	Servo Motores	18
2.5	Motor de Passo	19
2.5.1	Driver de Potência	21
2.6	Proteus	21
2.7	Visual Studio	22
3	Desenvolvimento do Protótipo	23
3.1	Ensaio de ionização por paper spray, no LaCEM	23
3.2	Desenvolvimento do sistema mecânico do amostrador automático	24
3.2.1	Cartucho de amostra	24
3.2.2	Dispenser de cartuchos	25
3.2.3	Mesa Giratória	26
3.2.4	Sistema de Fixação	26
3.3	Montagem Física do Sistema Mecânico	27
3.4	Desenvolvimento do sistema eletroeletrônico	30
3.4.1	Atuadores	30
3.4.2	Projeto do Circuito Eletrônico	32
3.4.3	Projeto da placa de circuito impresso	33
3.4.4	Placa de Circuito Impresso Desenvolvida	34
4	Interface Gráfica Amigável ao Usuário	36

5	Fluxograma Firmware do Microcontrolador	38
6	Montagem Final	40
7	Conclusão	42
	Referências	43

1 Introdução

Com origem do latim *automatus*, que significa mover por si só (MAHONEY, 2002), a palavra automação recebe diversas definições, em suma, a automação consiste no uso de comandos programados para realizar um dado processo, com o intuito de torná-lo mais eficiente, aumentando a produtividade e reduzindo tempo de uso de mão de obra especializada para a realização de atividades de baixa geração de valor.

Diante disso, a automatização é de grande valia em inúmeros processos, inclusive na execução de experimentos laboratoriais. Por meio do uso de instrumentos para facilitar e agilizar os procedimentos dos ensaios, possibilitando conexão à sistemas de supervisão computadorizados facilitando a operação, análise e processamento dos dados.

O presente estudo consiste no desenvolvimento de um sistema mecânico automatizado, de baixo custo, facilmente acoplado a um espectrômetro de massas, para carregamento de cartuchos de amostra descartáveis até uma posição pré-determinada, possibilitando a análise de diferentes amostras através de um sistema de supervisão, com o objetivo de reduzir significativamente o tempo gasto para montagem do ensaio para a técnica de ionização *paper spray ionization* (PSI).

1.1 Justificativas e Relevância

Apesar de todo o desenvolvimento já realizado em Espectrometria de Massas (MS), atualmente essa técnica analítica vem experimentando novas tendências. Esse novo rumo da MS tem como objetivo aumentar a variedade de aplicações da técnica e torná-la apta para os novos desafios analíticos: como a portabilidade do espectrômetro de massas (OUYANG; COOKS, 2009) e a simplicidade, expressa pelo desenvolvimento de fontes de ionização direta (HUANG et al., 2010), o que proporciona análises rápidas, de baixo custo e eficiente.

Diante disso, o trabalho proposto visa a criação de um amostrador automático que será utilizado no Laboratório de Cromatografia e Espectrometria de Massas (LaCEM) da Universidade Federal de Goiás, otimizando a montagem dos ensaios para técnica de ionização por *paper spray*, a qual é realizada de forma totalmente manual, demandando um maior tempo do pesquisador na montagem e análise de diferentes amostras.

1.2 Metodologia

Diante da necessidade proposta, foi realizado um estudo com a finalidade de adquirir conhecimento teórico da técnica de ionização por *paper spray* e de entender como eram executados os ensaios com PSI no LaCEM. Em seguida, foi realizada a modelagem de um sistema mecânico no software de CAD SolidWorks, onde foi desenvolvido o projeto da estrutura mecânica do amostrador automático. Após implementação física do sistema, iniciou-se o desenvolvimento dos projetos eletroeletrônicos e escolha dos atuadores para automatizar a fonte projetada. Para facilitar a utilização do amostrador automático pelos pesquisadores foi desenvolvido um sistema de supervisão em visual C#, como interface gráfica amigável. Para comunicação do *software* com a fonte desenvolvida foi utilizado o barramento de comunicação USB.

1.3 Objetivos Gerais

Desenvolvimento de um amostrador automático para otimizar os ensaios de ionização por *paper spray*, carregando cartuchos de diferentes amostras para serem analisadas por um espectrômetro de massas de forma automática.

1.4 Objetivos Específicos

Desenvolver um mecanismo eletromecânico, com objetivo de posicionar cartuchos de amostras com analitos diferentes para serem analisadas por um espectrômetro de massas.

Desenvolver o *hardware* que atenda os requisitos para utilização de um microcontrolador e garantir a alimentação e controle de atuadores.

Desenvolver o *firmware* do microcontrolador responsável pelo controle do sistema e a conexão entre *hardware* e o sistema supervisor.

Desenvolver sistema supervisor, interface gráfica amigável ao usuário, facilitando a utilização do amostrador automático.

Realizar a comunicação entre *software* e *hardware* via USB.

2 Fundamentação Teórica

2.1 Espectrometria de Massas

De acordo com Alberci et al. (2010) a espectrometria de massas é uma técnica analítica com aplicação nas mais diversas áreas da ciência, sendo capaz de detectar e quantificar os constituintes, que são ionizados de uma matriz complexa com alta sensibilidade e seletividade, consistindo em uma técnica versátil em análises químicas. A análise é realizada por um espectrômetro de massas que consiste em um equipamento no qual os constituintes de uma amostra são convertidos em íons, que são gerados a partir de um agente ionizante, seguido por um analisador que faz a separação de acordo com a relação massa/carga (m/z) e um detector que possui a função de contabilizar o número de íons de cada m/z gerado, transformando a corrente de íons em sinais elétricos que, posteriormente, serão enviados para um sistema computacional para análise dos dados e geração de um espectro de massas.

O primeiro passo para a simplicidade e portabilidade em espectrometria de massas ocorreu em 2004, com a revolução representada pela criação de uma nova família de técnicas de ionização que agora são conhecidas como técnicas de ionização ambiente (ALBERCI et al., 2010). Apresentando a análise com o mínimo ou nenhum preparo da amostra, sendo que a ionização é realizada no ambiente natural do analito, diretamente na amostra, revolucionando a espectrometria de massas que passou a apresentar simplicidade nas análises. A análise é realizada diretamente sobre a superfície da amostra e informações sobre sua composição podem ser obtidas em tempo real no espectrômetro de massas (HUANG et al., 2010).

Dentre as técnicas de ionização ambiente, foi desenvolvida pelo grupo de pesquisa do professor Prof. Dr. R.G Cooks a fonte de ionização por Paper Spray (PSI) apresentando um grande potencial, devido a simplicidade e a possibilidade de acoplá-las com qualquer sistema que opere com uma fonte de ionização atmosférica.

Na Figura 1, é apresentado o princípio de funcionamento de um espectrômetro de massas que possui um sistema de introdução de amostra, normalmente constituído por: uma bomba de infusão direta, ou por um sistema de separação como a cromatografia líquida de alta eficiência (CLAE); uma fonte de ionização onde são gerados os íons, como por exemplo a fonte de ionização de *electrospray* (ESI); um analisador, como exemplo, o analisador por *Time-of-Flight* (TOF), *ion trap* (IT) e o analisador de ressonância ciclônica de íons

(ICR); e um detector, como exemplo, o detector MCP (Microchannel plate) (CARVALHO, 2015).

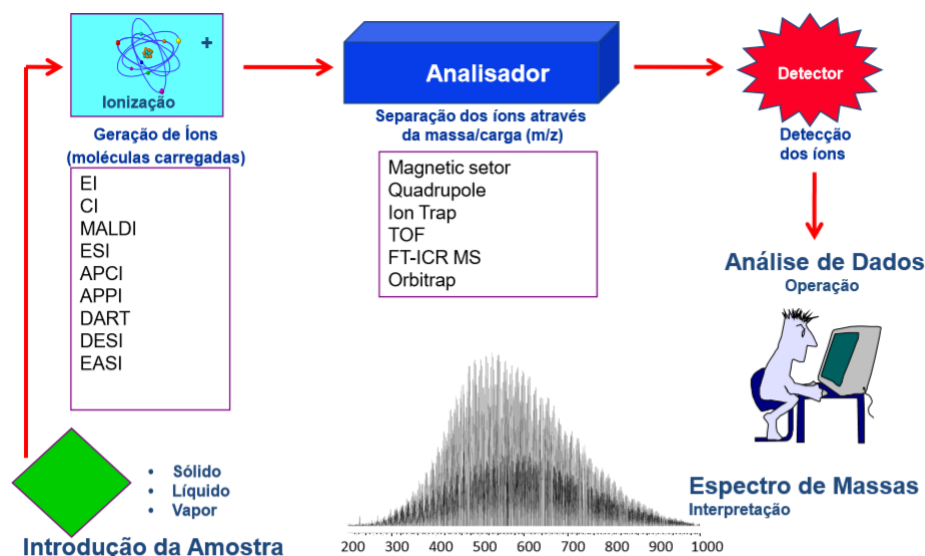


Figura 1: Esquema de funcionamento de um espectrômetro de massas.

Fonte: (BONIEK VAZ, 2014)

2.2 Ionização por Paper Spray acoplada a Espectrometria de Massas

Paper spray Ionization (PSI) é um método de ionização usado para analisar misturas complexas por espectrometria de massas, sem a necessidade de preparação da amostra. Apresentando análises rápidas de amostras biológicas complexas como urina, sangue, tecidos biológicos, realização do monitoramentos de drogas, análise de inorgânicos, análise da concentração de açúcares entre outras.

A fonte de ionização por *Paper Spray* foi criada em 2010 pelo grupo do Prof. Dr. R.G Cooks, sendo um fio soldado a uma garra jacaré fixada a um suporte por outra garra. O método consiste na aplicação de uma alta voltagem em um papel de formato triangular umedecido com uma solução do analito, que é depositada ao centro do papel que por capilaridade espalha-se alcançando à extremidade (LIU et al., 2010). O campo elétrico, oriundo da aplicação de uma alta voltagem (3-5 kV) no papel, induz a formação de um spray (Figura 2) (YANG et al., 2012). PSI é essencialmente um processo baseado no ESI: o forte campo elétrico na ponta afiada do papel resulta na formação de um cone de Taylor invadindo uma pluma de gotículas carregadas, que após a dessolvatação geram íons na fase gasosa possibilitando a análise a nível molecular pelo espectrômetro de massas (LIU et al., 2010).

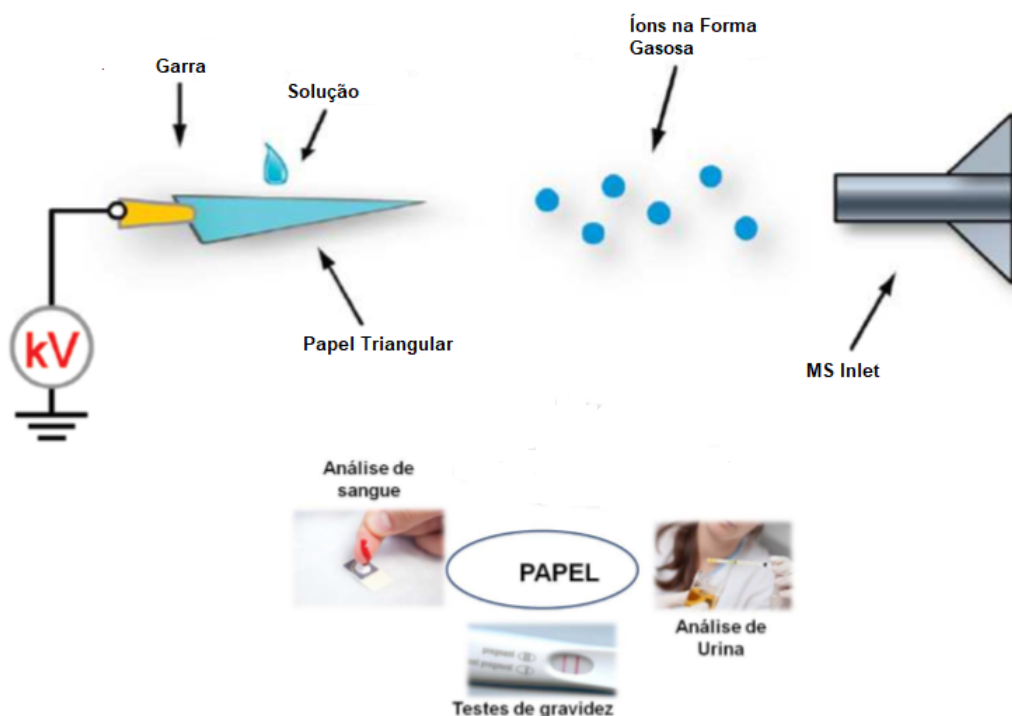


Figura 2: Esquema de ionização *paper spray* por um espectrômetro de massas.

Fonte: (COOKS, R . G, 2010)

Graças a este processo, tem-se a dessorção do analito em sua forma iônica a partir do papel (YANG et al., 2012). O papel triangular deve ter um ponto macroscopicamente acentuado com ângulo de ponta entre 60 ° e 90 °. A duração do spray é em torno de um minuto, pois neste intervalo o solvente evapora ou é pulverizado. Um esquema de análise rápida de uma amostra de sangue é exibido na figura 3.

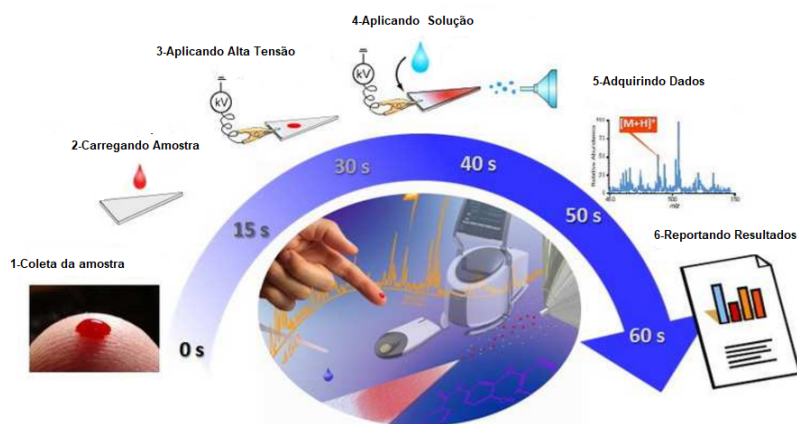


Figura 3: Esquema de análise rápida ionização *paper spray*.

Fonte: (COOKS, R . G, 2010)

2.3 Microcontrolador

O microcontrolador consiste em um pequeno circuito integrado feito de silício onde é possível reunir em um único encapsulamento um circuito eletrônico completo que exerça uma determinada função. Sendo utilizado no controle de processos lógicos, possuindo inteligência programável, dotado pelos componentes necessários ao controle de processos. Construído com base na arquitetura Harvard com instruções do tipo RISC (Computador com Conjunto Reduzido de Instruções), ou arquitetura tradicional do tipo Von-Neumann, possuem internamente uma CPU (Unidade Central de processamento), memória de dados e de programa, diferentes tipos de comunicação, temporizadores, contadores, conversores A/D entre outras funcionalidades integrados em um mesmo dispositivo (SOUZA, 1999)

Os microcontroladores são computadores que realizam instruções previamente programadas em linguagens de programação como C, C++, Java ou em mais baixo nível como Assembly. Eles são conhecidos como computadores embutidos em circuitos integrados, contendo periféricos de entrada e saída (ANGNES, 2003).

O microcontrolador representa a unidade de processamento de o todo sistema embarcado, tendo a capacidade de realizar leitura de sinais analógicos e digitais externos, executar rotinas de códigos com tarefas pré-programadas, processar sinais para atuadores de forma que as interações ocorram da maneira com a qual foi projetada (CHASE; ALMEIDA, 2007).

Nas etapas de projetos de sistemas embarcados, que se classificam em dispositivos dedicados a executar uma única tarefa, é necessário uma especificação sucinta dos requisitos funcionais do sistema para seleção dos dispositivos necessários, demandando a especificação de *hardware* e *software*, quantidade de entrada e saídas, interfaces com outros sistemas entre outras funcionalidades. Em seguida, a seleção do microcontrolador a ser utilizado no projeto, deve atender a demanda proposta de forma eficiente.

Diante disso, devido a necessidade de realizar a comunicação USB do dispositivo com uma interface gráfica amigável, e quantidade de entradas e saídas requeridas pelo sistema, foi selecionado o microcontrolador PIC 18F2550 da Microchip, para ser o responsável pela "inteligência" do amostrador automático.

2.3.1 Microcontrolador PIC

A família 18F de microcontroladores PIC da Microchip, possui uma estrutura de máquina interna do tipo Harvard, enquanto grande parte dos microcontroladores tradicionais apresentam uma arquitetura tipo VonNeumann. A diferença está na forma como os dados e o programa são processados pelo microcontrolador. Na arquitetura tradicional, tipo Von-Neumann, existe apenas um barramento (bus) interno (geralmente de oito bits), por onde passam as instruções e os dados. Já na arquitetura tipo Harvard

existem dois barramentos internos, sendo um de dados e outro de instruções. No caso dos microcontroladores PIC da família 18F, o barramento de dados é sempre de oito bits e o de instruções pode ser de 12, 14 ou 16 bits, dependendo do microcontrolador. Esse tipo de arquitetura permite que, enquanto uma instrução é executada, outra seja “buscada” da memória, o que torna o processamento mais rápido. Além disso, como o barramento de instruções é maior do que oito bits, o OP-CODE da instrução já inclui o dado e o local onde ela vai operar (quando necessário), o que significa que apenas uma posição de memória é utilizada por instrução, economizando assim memória de programa (SOUZA, 1999).

Os PICs possuem mais ou menos 35 instruções (variável de acordo com o microcontrolador), muito menos que os microcontroladores convencionais (CISC) que chegam a possuir mais de cem instruções, tornando o aprendizado mais fácil e dinâmico, entretanto muitas funções não possuem uma instrução direta, exigindo maior habilidade do programador (SOUZA, 1999).

2.3.2 PIC18F2550

Para a realização deste trabalho foi utilizado o PIC 18F2550, pertencente à família 18F da Microchip, este microcontrolador apresenta elevado desempenho de processamento. Possui 28 pinos dentre eles 24 podem ser configurados como entrada e saída, apresenta barramento de comunicação USB capaz de operar no modo *low-speed* (1.5Mbps) ou *full-speed* (12Mbps) e periféricos como memória EEPROM de 256 bytes, 13 conversores analógicos/digitais, dois módulos CCP, quatro *timers*, um módulo de comunicação SPI, um módulo de comunicação I2c (MICROCHIP, 2017). O diagrama de pinagem do PIC18F2550 pode ser visto na Figura 4.

28-Pin PDIP, SOIC

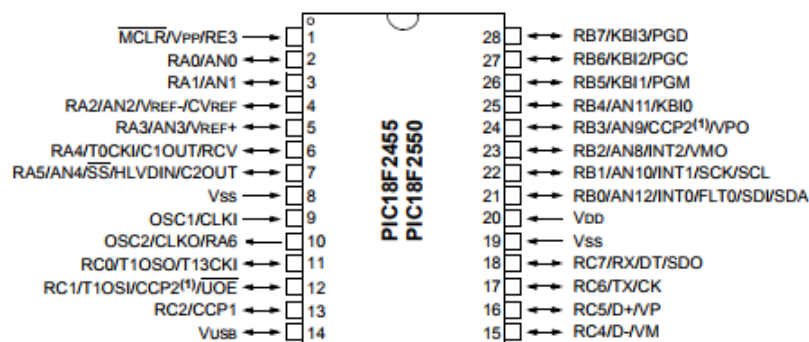


Figura 4: Disposição da pinagem do PIC18F2550.

Fonte: (MICROCHIP, 2017)

O diagrama de blocos com as características do PIC18F2550 é apresentado na Figura 4.

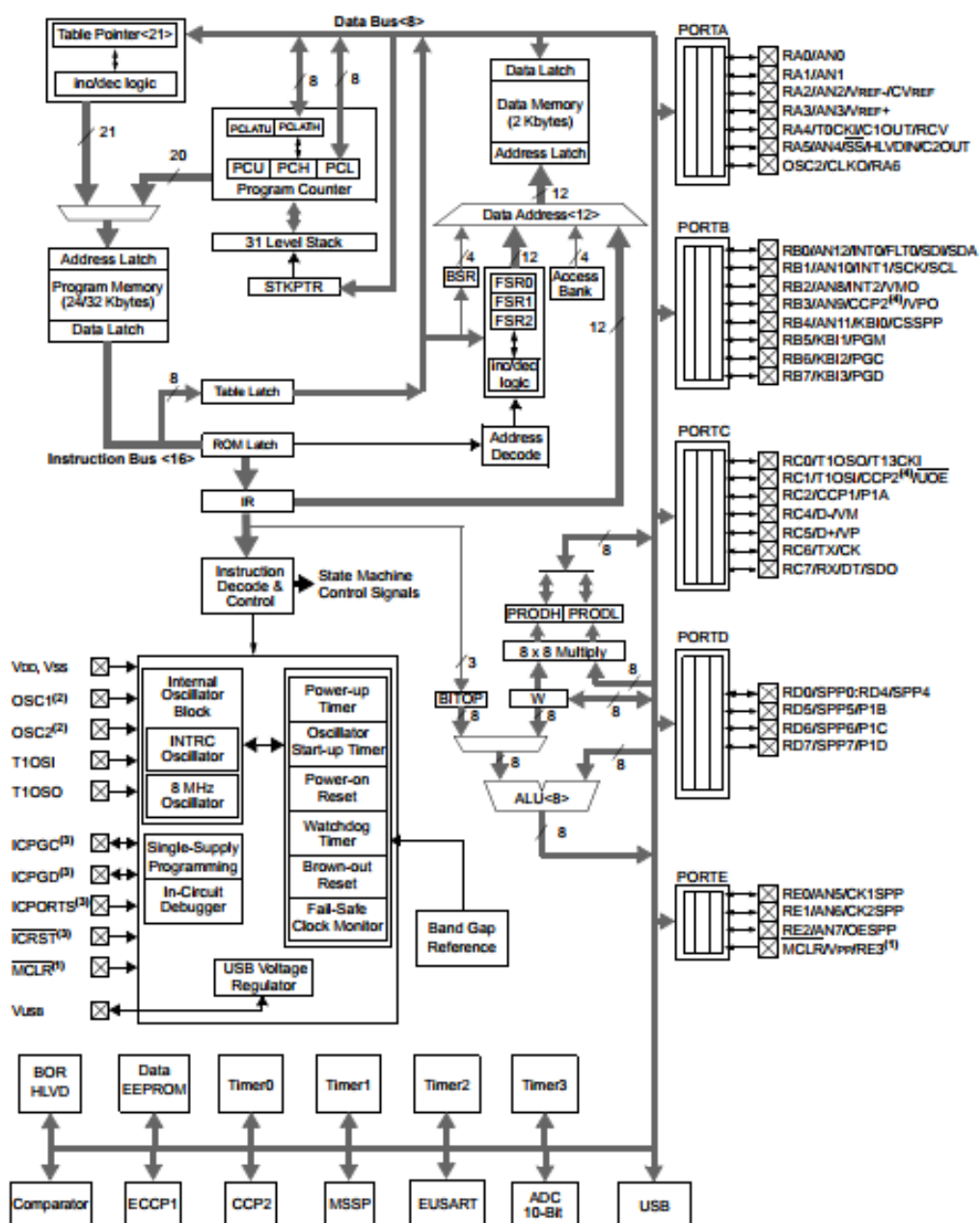


Figura 5: Diagrama de blocos PIC18F2550.

Fonte:(MICROCHIP, 2017)

2.3.3 Módulo CCP (*PWM*)

Neste trabalho, devido a necessidade do controle de posição de servomotores, um dos dois tipos de atuadores presentes no amostrador automático, uma das alternativas consiste em utilizar os dois módulos CCPs padrão (*standard* CCP), presentes no PIC

18F2550, com o objetivo de gerar modulação de pulso necessário para controle deste atuador.

O PWM (Pulse Wide Modulation) consiste em um sinal de frequência fixa no qual é variado o ciclo ativo da onda, muito utilizado no controle de potência, no controle de velocidade de motores CC, acionamento de fontes chaveadas além de servocomandos e outros dispositivos.

O PWM é um dos recursos mais relevantes dos módulos CCPs, pois com ele é possível obter uma tensão analógica a partir de um sinal digital, variando o valor da transferência de potência entregue a uma carga. Em um sistema PWM, chaves de estado sólido (normalmente IGBT, MOSFET ou transistor bipolar) são utilizadas para controlar o fluxo de corrente (PEREIRA, 2005). O ciclo de onda gerado pelo módulo PWM onde é possível variar o ciclo ativo (*duty cycle*), quanto maior o *duty cycle*, razão cíclica, maior a tensão média e a potência fornecida (Figura 6).

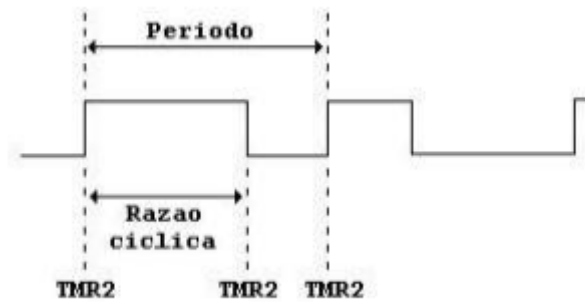


Figura 6: *Duty Cycle* do PWM.

Fonte:(SALERMO; CAMACHO; FILHO, 2002)

Com base no tempo do Timer 2, o microcontrolador PIC 18F2550 gera um PWM de 10 bits, cujo período é configurado pela Equação 2.1 de acordo com o registrador PR2.

$$PWMPeriodo = [(PR2) + 1] * 4 * TOSC * (TMR2PrescaleValue) \quad (2.1)$$

E o ciclo de trabalho do PWM é especificado pelos registradores CCPRxL e DCxB1:DCxB0 de acordo com a Equação 2.2.

$$CT_{pwm} = (DCxB9 : DCxB0bitsvalue) * Tosc * (TMR2prescale) \quad (2.2)$$

2.3.4 Comunicação USB

O barramento USB foi desenvolvido à partir consórcio de empresas, dentre elas pode-se destacar Compaq, DEC, IBM, Intel, Microsoft, Nec e North Telecom. Como o próprio nome sugere, é um barramento serial para conexão de periféricos á um PC. Periféricos podem ser adicionados a um computador por meio da USB, sem que haja a necessidade de instalação de uma placa para isso. Não é completamente livre, parte do protocolo é restrita aos compradores da tecnologia.

Este Barramento conta com 4 fios internos, sendo dois deles destinados para a alimentação (+5V e GND) e os outros 2 fios transmitem os dados de maneira diferencial (D+ e D-). O USB é capaz de fornecer tensão de alimentação de 5V aos dispositivos de baixo consumo, podendo chegar a taxas de comunicação de 480Mbps na versão 2.0 High-Speed (MIYADAIRA, 2005). O PIC18F2550 apresenta velocidade máxima de comunicação de 12Mbps no modo *full-speed*.

A topologia da USB é organizada na forma de um barramento composto de elementos com papéis de dispositivo (*device*) e de hospedeiro (*host*). Um dispositivo é um periférico no barramento que apenas responde a requisições do *host*. O dispositivo deve detectar dados direcionados a si, responder às requisições, gerenciar a própria energia, efetuar checagens de erros e trocar dados com o *host*. Os *hosts* são elementos que se comunicam com os dispositivos no barramento, gerenciam as comunicações e formatam dados a serem transmitidos e recebidos de forma que os componentes do sistema operacional entendam (AXELSON, 2001).

Para utilizar os microcontroladores PIC e USB, existem três tipos de comunicação possíveis:

- Human Interface Device (HID), que basicamente é utilizado em dispositivos como mouses, teclados, entre outros;
- Mass Storage Device (MSD), implementado em dispositivos como drives de DVD e HD externo;
- Communication Device Class (CDC);

Para comunicação do amostrador automático com a interface gráfica, foi utilizada a comunicação USB no modo HID, na qual foi criado um protocolo de comunicação onde os dados são enviados em pacotes de 8 bits.

2.4 Servo Motores

Os servo motores são utilizados em diversas aplicações, quando se tem a necessidade de movimentar algo de maneira precisa e controlada, possuindo a capacidade de movimentar o seu braço e manter a posição mesmo com forças em direções contrárias.

São constituídos por um potenciômetro ligado ao eixo de saída do servo, que monitora a posição, por um circuito de controle responsável pelo monitoramento do potenciômetro e acionamento do motor, visando obter uma posição pré-determinada, por um motor que movimenta as engrenagens e o eixo principal do servo. Essas engrenagens reduzem a rotação do motor, aumentando o torque ao eixo principal de saída e movimentam o potenciômetro junto com o eixo. A parte interna de um servo motor pode ser conferida na figura 7.

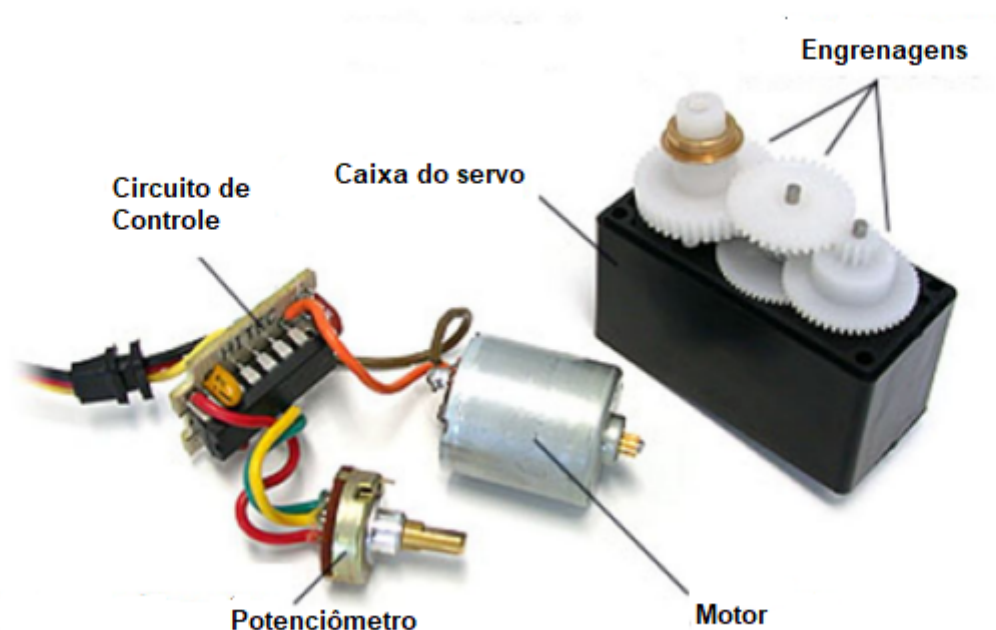


Figura 7: Componentes de um Servo Motor.

Fonte: (Notas de aula Unesp)

O servo motor possui 3 fios de saída: dois de alimentação, onde é alimentado com tensões de 5V e um de sinal onde recebe um sinal no formato PWM que é monitorado em uma frequência de 50Hz (intervalos de 20 ms) pelo circuito de controle. Caso neste intervalo o circuito de controle detecte alteração na largura do pulso, ele altera a posição do eixo para que sua posição coincida com o sinal recebido.

Um sinal com largura de pulso em nível lógico alto de 1 ms corresponde à posição do servo todo à esquerda, ou 0 grau.

Um sinal com largura de pulso, em nível lógico alto, de 1,5 ms corresponde à posição central do servo ou de 90 graus.

Um sinal com largura de pulso, em nível lógico, alto de 2 ms corresponde à posição do servo todo à direita, ou 180 graus.

Na Figura 8 é apresentado os sinais de controle de um servo motor.

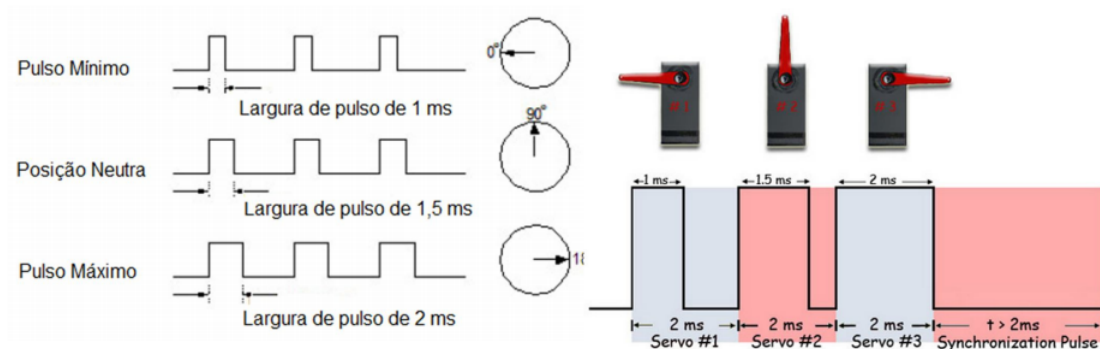


Figura 8: Sinais de controle de um Servo Motor.

Fonte: (Notas de aula Unesp)

2.5 Motor de Passo

Motores de passo são atuadores eletromecânicos incrementais não-lineares, que permitem o controle preciso de posição e velocidade, aliado a um baixo custo que faz do motor de passo a escolha ideal para um grande número de aplicações (CAO; SCHWARTZ, 1999).

Estes motores são usualmente empregados em aplicações de medição e de controle, podendo ser encontrados em impressoras de jato de tinta, máquinas de Controle Numérico Computadorizados (CNC), bombas volumétricas entre outras aplicações.

A propriedade que diferencia o motor de passo dos demais motores elétricos é a capacidade de fazer movimentos incrementais precisos em malha aberta. Essas rotações discretas são chamadas de passo (ACARNLEY, 2002).

Os motores de passo apresentam como características:

- Não possuem escovas, os comutadores e escovas dos motores convencionais são componentes que apresentam a maioria das falhas;
- Giram com uma dada velocidade independente da carga, desde que não excedam o torque do motor;

- Movem à partir de incrementos ou passos que podem ser quantificados, permitindo o controle em malha aberta;
- Apresentam excelente resposta a partida, parada e reversão de movimento, sendo capaz de manter o eixo estacionário dentro dos limites de torque;

Os motores de passo geralmente possuem duas fases e podem ser unipolares ou bipolares. Neste trabalho, foi utilizado um motor de passo unipolar. Nos motores de passo unipolares são usados dois enrolamentos por fase e costumam ter um contato em comum, resultando em cinco, seis ou oito conexões. Eles são chamados de unipolares e facilitam o projeto por não necessitarem de ligação reversa nos pólos. Os modelos com cinco ou seis conexões têm as bobinas ligadas em série e necessitam da capacidade de reverter as ligações entre as bobinas. A Figura 9 apresenta o esquema de ligação das bobinas de um motor unipolar de cinco conexões.

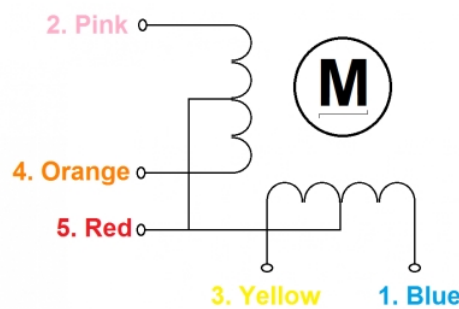


Figura 9: Ligação das bobinas de motor de passo unipolar com 5 conexões.

Ligação reversa é um tipo de ligação muito comum entre motores onde os polos A e B das bobinas podem ser ligados ao positivo e negativo, respectivamente; Ou invertida, negativo e positivo, respectivamente.

A forma como as fases do motor de passo são excitadas determina o tamanho do incremento de rotação e o torque disponível. Existem três modos de excitação: passo completo, meio passo e micro-passo. O modo passo completo pode ser obtido energizando as fases de forma sequencial, uma ou duas de cada vez. Energizar duas fases de cada vez gera mais torque no rotor. Outra forma é energizar duas fases e desenergizar uma na sequência, obtendo assim um meio passo. No modo micro passo, é feita uma variação quase contínua da energização das fases – assim, um passo pode ser subdividido. O passo é dividido, tipicamente, por 4, 8 ou 16. Entretanto, existem sistemas capazes de subdividir um passo milhares de vezes, aumentando a complexidade do driver e diminuindo a precisão.

2.5.1 Driver de Potência

A parte de potência para acionar o motor de passo tem duas funções principais: A primeira consiste em alimentar o motor com a corrente e tensão elétrica necessária para o funcionamento. A segunda, proteger o circuito de acionamento, onde devem ser utilizadas malhas de proteção como diodos, opto-acopladores, ou circuitos integrados prontos que impeçam a passagem de corrente no sentido do microcontrolador. No caso estudado, foi utilizado um módulo ULN2003A cuja função é receber os sinais do microprocessador e enviá-los amplificados ao motor de passo para que este possa ser movimentado.

O ULN2003A consiste em uma matriz de sete pares de transistores Darlington NPN, apresentando versatilidade para diversas aplicações, incluindo solenoides, relés, lâmpadas, motores pequenos e LEDs. Apresenta corrente de saída máxima de 500 mA, saída de sustentação de 50V e entradas compatíveis com diversos tipos de lógicas (TOSHIBA, 2010).

O ULN2003A possui internamente circuitos amplificadores em cascata, permitindo a entrada de um sinal de baixa potência e saída em potência de alimentação para outro circuito, isolando os dois, como pode ser visto na figura 10.

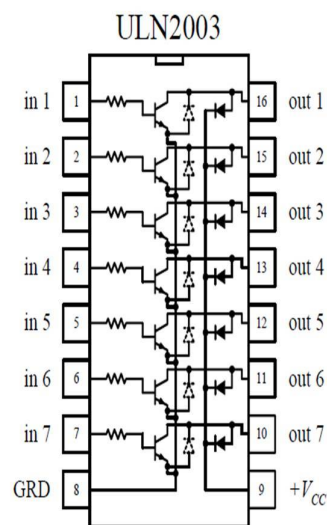


Figura 10: Chip ULN2003.

2.6 Proteus

Desenvolvido pela Labcenter Electronics, o Proteus consiste em uma suíte de aplicativos de desenho esquemático e *layouts* de placas de circuitos impressos, auxiliando nos primeiros passos para obtenção de um protótipo. O Proteus combina facilidade de uso, com uma grande variedade de componentes prontos para simulação de suas funcionalidades, minimizando o tempo gasto pelo projetista na criação e desenvolvimento de seus projetos.

Segundo Santos (2014), o *software* Proteus é uma ferramenta útil para estudantes e profissionais que desejam aperfeiçoar suas habilidades para o desenvolvimento de aplicações em sistemas eletrônicos e embarcados. Ele permite o desenho de circuitos empregando um entorno gráfico, no qual é possível colocar os símbolos representativos dos componentes e realizar a simulação de seu funcionamento sem o risco de ocasionar danos aos circuitos.

O *software* é dividido em dois ambientes principais: ISIS e ARES. O ISIS permite a criação de esquemas elétricos possuindo ferramentas de simulação do esquema desenvolvido. Já o ARES é um ambiente que permite a criação de *layouts* dos circuitos impressos.

2.7 Visual Studio

O Microsoft Visual Studio é um pacote de programas da Microsoft para desenvolvimento de *software* especialmente dedicado ao .NET Framework. Os aplicativos são construídos sobre os serviços da *Common Language Runtime*. A *Common Language Runtime* gerencia a execução de memória, execução de código, verificação de segurança, compilação e outros serviços do sistema. A biblioteca de classes do .NET é uma coleção orientada a objetos de tipos reutilizáveis que se integram rigidamente a linguagem comum. Pode-se usar esses tipos para desenvolver aplicativos de GUI (interface) na tradicional linha de comando ou gráfica do usuário, bem como sistemas autônomos, aplicativos baseados em XML da Web asp.net e Web Formulários. Os aplicativos podem ser desenvolvidos no Visual Basic, Visual C#, Visual F# ou Visual C++, qualquer uma dessas linguagens de programação pode ser usada igualmente bem (JOHNSON, 2012).

3 Desenvolvimento do Protótipo

3.1 Ensaio de ionização por paper spray, no LaCEM

Na Figura 11, é apresentado a montagem para análise pelo método de ionização por *paper spray* realizada no Laboratório de Cromatografia e Espectrometria de Massas (LaCEM) da Universidade Federal de Goiás, seguindo as orientações do Prof. Dr. G. Cooks, criador da fonte de ionização. A montagem consiste em um fio soldado a uma garra de jacaré fixada em um suporte, na qual é preso um papel de filtro ou cromatográficos, no formato triangular, umedecido com uma solução do analito que é depositado no centro do papel (a solução é espalhada por capilaridade).

A amostra é posicionada em frente ao *inlet* do espectrômetro de massas Q-Exactive, de onde é fornecido a tensão necessária para a dessolvatação e geração dos íons na fase gasosa, formando um cone de Taylor. A alta tensão chega ao papel triangular à partir do fio soldado à garra de jacaré que é ligado a uma fonte de alta tensão presente no espectrômetro.



Figura 11: Montagem de uma fonte de ionização por *paper spray* no LaCEM.

Fonte: (LaCEM, 2017)

A substituição das amostras e montagem deste ensaio é feita de forma totalmente manual, consumindo maior tempo dos pesquisadores para análise de diversas amostras. Diante disso, este trabalho consiste no desenvolvimento de um primeiro protótipo de um amostrador automático, de baixo custo, com intuito de automatizar a montagem e facilitar a análise de analitos diferentes, sem a necessidade de realizar uma nova montagem.

3.2 Desenvolvimento do sistema mecânico do amostrador automático

Baseado na fonte comercial velox 360, da Prosolia apresentada na Figura 12, foi iniciado um estudo da melhor maneira para desenvolver um amostrador automático portátil, que fosse desacoplado facilmente do espectrômetro de massas, para que fossem realizadas as demais técnicas de análise.

O velox 360, consiste em um amostrador automático comercial, possui um *design plug and play* que se adapta perfeitamente ao espectrômetro de massas, apresenta um cartucho próprio que permitem a análise direta e quantitativa de apenas alguns microlitros de amostra. Carrega automaticamente até 40 cartuchos que recebe diretamente a alta tensão e permite a criação do *electrospray* da amostra necessário para a ionização.



Figura 12: Velox 360, fonte comercial para a técnica de ionização por paper spray.

Fonte: (Prosolia,2017)

3.2.1 Cartucho de amostra

De acordo com a necessidade de realizar a ionização de diversas amostras, foi desenvolvido um protótipo de um cartucho em acrílico. Cada cartucho foi projetado para

receber um papel triangular onde serão depositadas as amostras distintas. Com a finalidade de realizar o contato elétrico com a fonte de alta tensão, indispensável no processo de ionização, o papel é posicionado em cima de uma placa de fenolite apresentada na Figura 13. Cada cartucho será alimentado pela fonte de tensão através de um mecanismo.

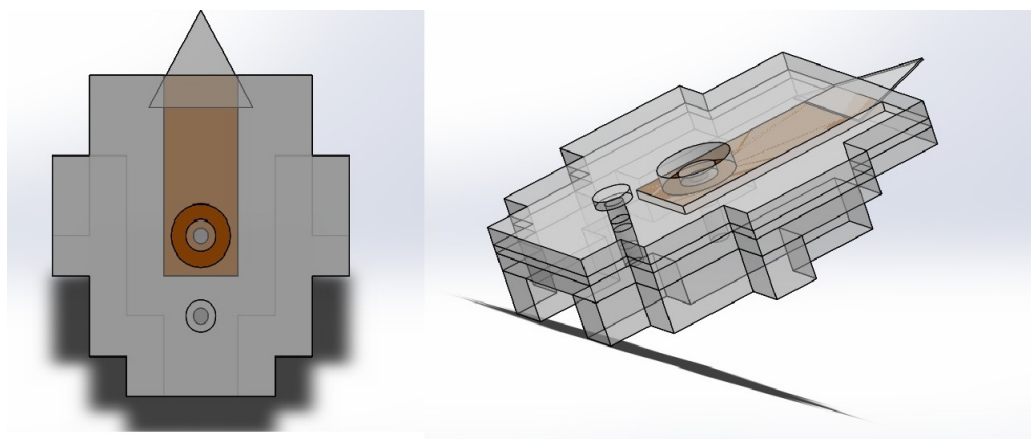


Figura 13: Desenho esquemático de um cartucho de amostras.

3.2.2 Dispenser de cartuchos

Os cartuchos foram projetados para serem empilhados em um trilho (Figura 14), e serão dispensados de acordo com a sequência de análises, sendo controlado pelo pesquisador através de uma interface gráfica amigável.



Figura 14: Desenho do trilho para empilhamento de cartuchos de amostra.

3.2.3 Mesa Giratória

Após dispensados, os cartuchos entrarão em uma mesa giratória, com a finalidade de serem posicionados em frente ao *inlet* do espectrômetro de massas para que seja realizada a técnica de ionização por *paper spray*. Na Figura 15 é apresentada a mesa giratória acoplada ao dispenser.

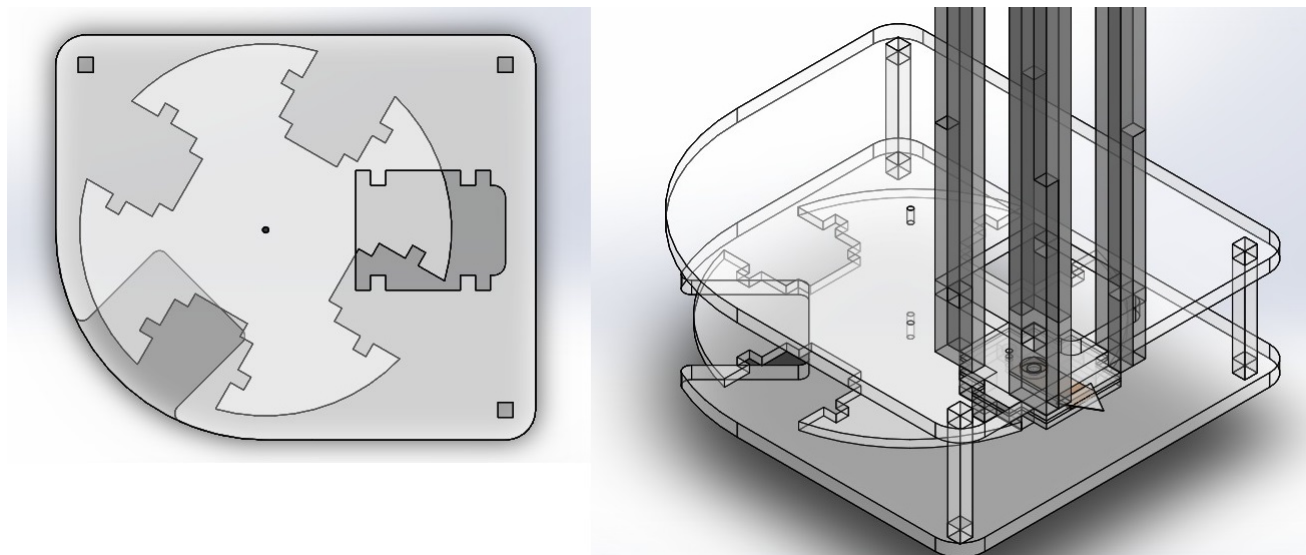


Figura 15: Desenho do acoplamento entre a mesa giratória e o dispenser de cartuchos.

3.2.4 Sistema de Fixação

Na Figura 16 é exibido a montagem mecânica sem os atuadores que será fixada ao espectrômetro de massas.

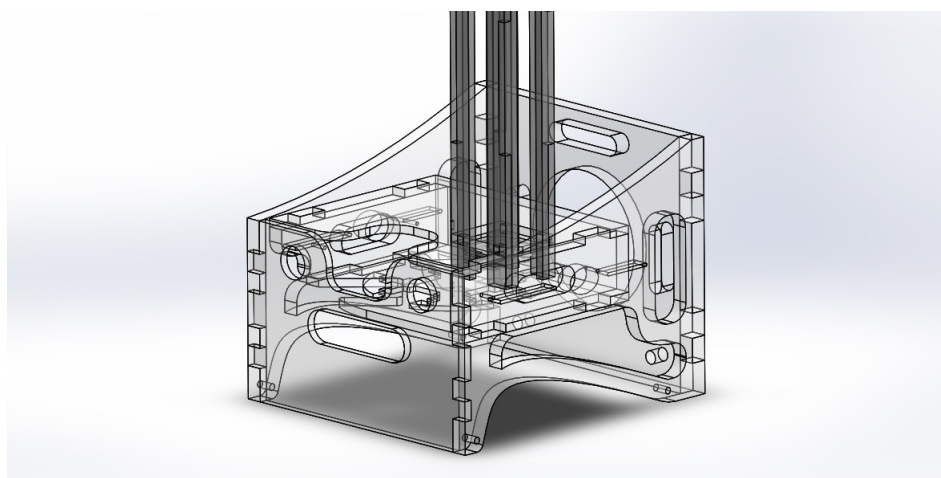


Figura 16: Montagem do amostrador automático sem os atuadores.

3.3 Montagem Física do Sistema Mecânico

Após projetado os constituintes do sistema mecânico proposto, foi realizada a prototipagem das peças em acrílico, onde a execução dos cortes foram executados por máquina de corte a laser. Pode ser visto na Figura 17 a montagem do cartucho onde será fixado a amostra do papel triangular, explicitando o contato elétrico proporcionado pela placa de fenolite cobreada.

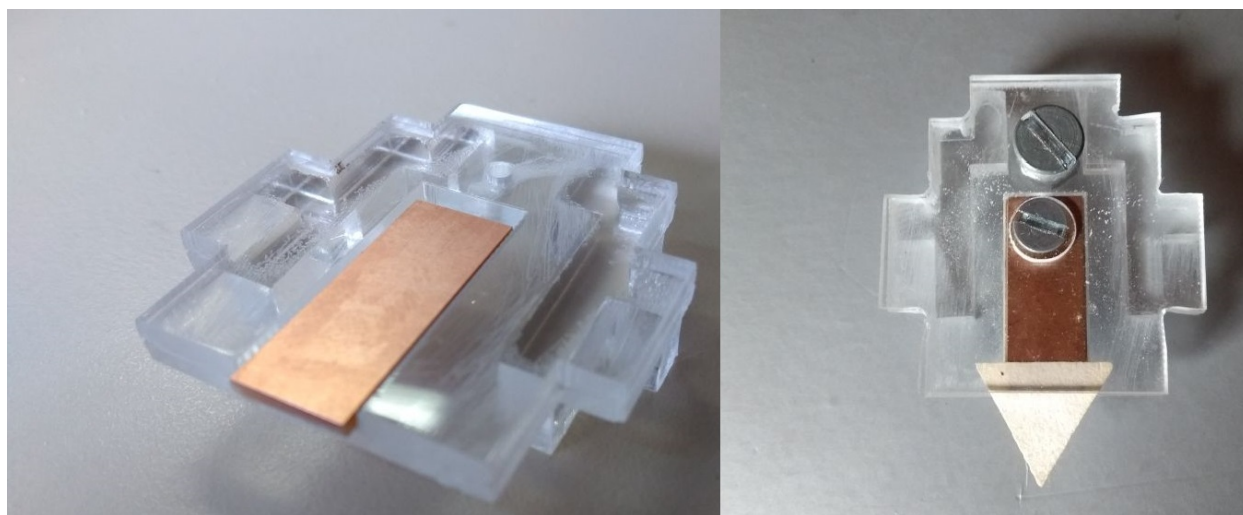


Figura 17: Montagem do cartucho.

Na Figura 18 nota-se o encaixe dos cartuchos em uma mesa giratória que é responsável pelo posicionamento da amostra em frete ao *inlet* do espectrômetro de massas. O movimento é proporcionado por um atuador.

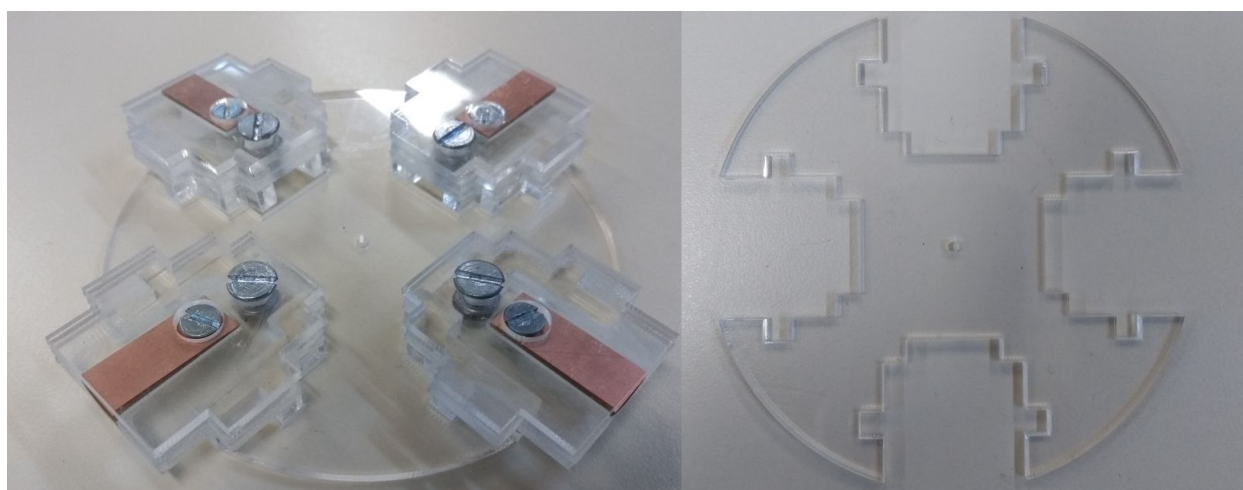


Figura 18: Mesa Giratória.

Na Figura 19 é apresentada a base móvel, para fixação do trilho e a mesa giratória. A base apresenta um corte na parte inferior com objetivo de descartar os cartuchos que

já foram analisados. Na figura 20 exibe-se a base com o trilho e mesa giratória na parte inferior.

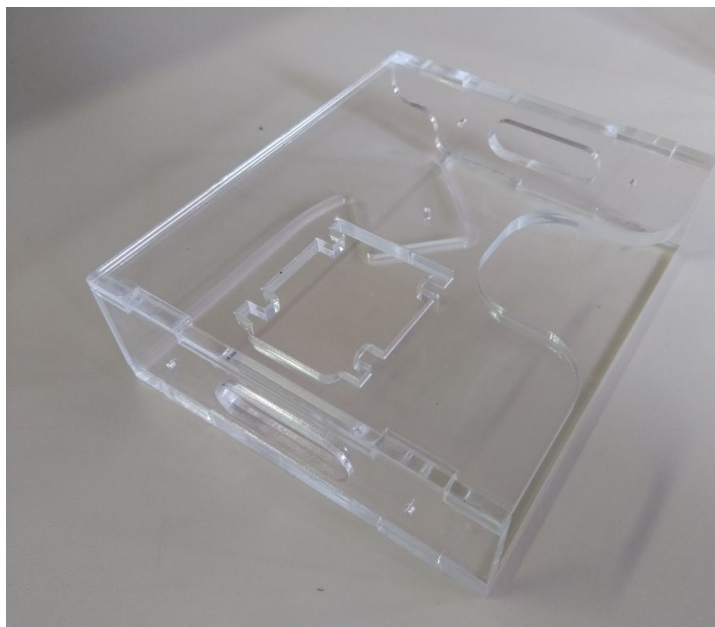


Figura 19: Base Móvel.

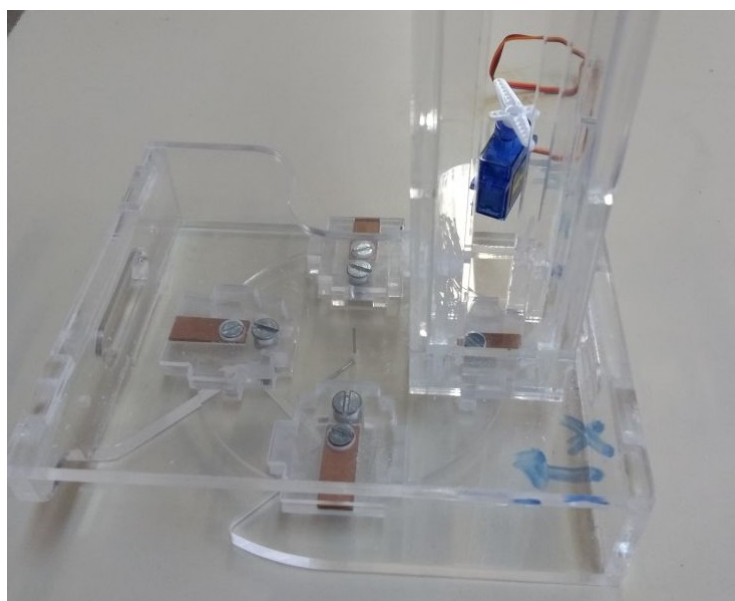


Figura 20: Trilho Acoplado na Base Móvel.

Como pode ser visto na figura 21, a base é montada em um suporte que será acoplado ao espectrômetro de massas. Devido à necessidade de variar a distância entre papel triangular e o *inlet* do espectrômetro de acordo com o analito a ser analisado, a base foi fixada ao suporte por quatro parafusos apresentando mobilidade no eixo X, que após acoplamento à máquina receberá um adesivo milimetrado para ajuste manual da distância.



Figura 21: Base móvel apresentando liberdade de movimento no eixo X.

Para que a tensão fornecida pelo espectrômetro chegue ao papel, ao ser posicionado, o cartucho move uma haste de alumínio, que apresenta pequena mobilidade no eixo Y, no qual será feito contato com o fio da fonte tensão através de um parafuso. Ao chegar na posição de análise é estabelecido contato elétrico entre o fenolite cobreado e o cartucho. O mecanismo pode ser visto na Figura 22.

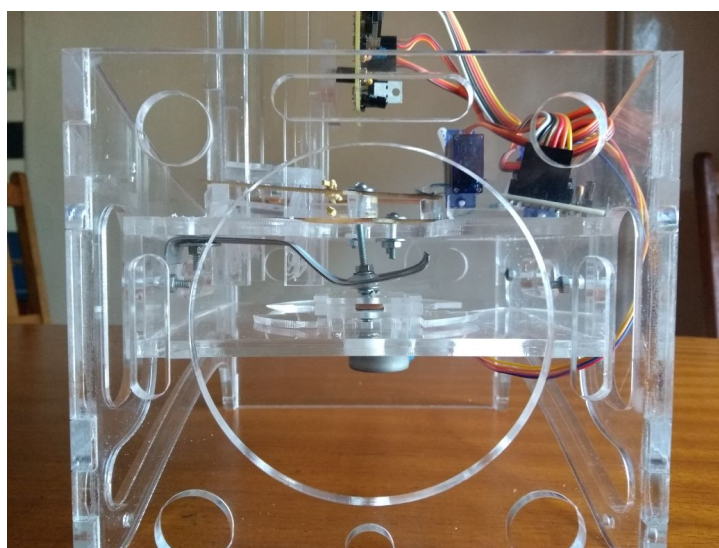


Figura 22: Contato elétrico entre cartucho e fonte de alta tensão.

3.4 Desenvolvimento do sistema eletroeletrônico

3.4.1 Atuadores

Com a finalidade de automatizar, o sistema mecânico projetado, permitindo o dinamismo necessário para realização da ionização por Paper Spray foram selecionados dois tipos de atuadores: servo motores e motor de passo.

Os servo motores são responsáveis por garantir a alimentação de cartuchos do dispenser para a mesa giratória de forma ordenada carregando, um cartucho por vez. Foi desenvolvido um sistema com duas garras acionadas por dois servos motores como mostra nas Figuras 23 e 24, onde os servos motores acionados em sequência permitem a passagem de somente um cartucho de amostra por vez.

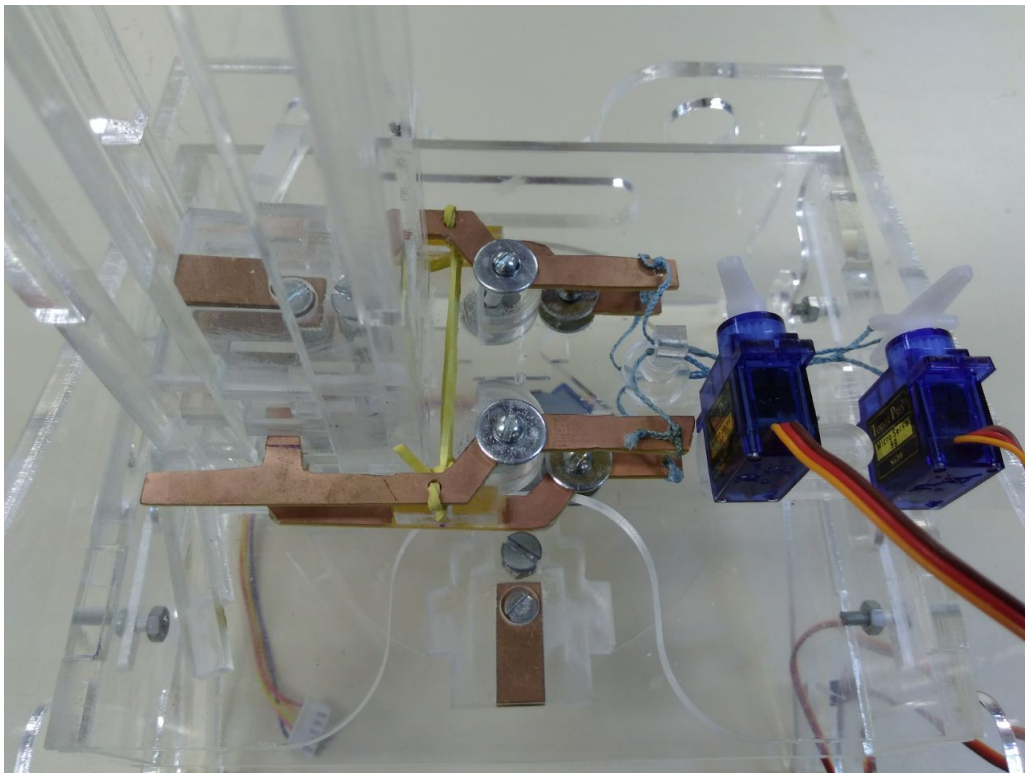


Figura 23: Sistema de abertura do dispenser de cartuchos.

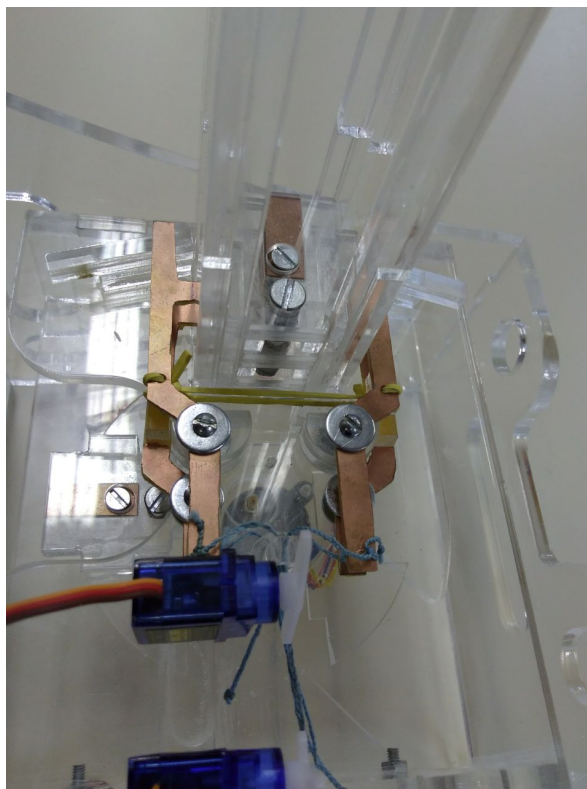


Figura 24: Automação do Dispenser.

Para atuação no posicionamento do cartucho a ser analisado, a mesa giratória foi conectada ao eixo de um motor de passo, que a partir de incrementos é responsável por posicionar o cartucho com papel triangular em frente ao *inlet* do espectrômetro de massas. NA Figura 25 nota-se o eixo do motor de passo interligado à mesa giratória.

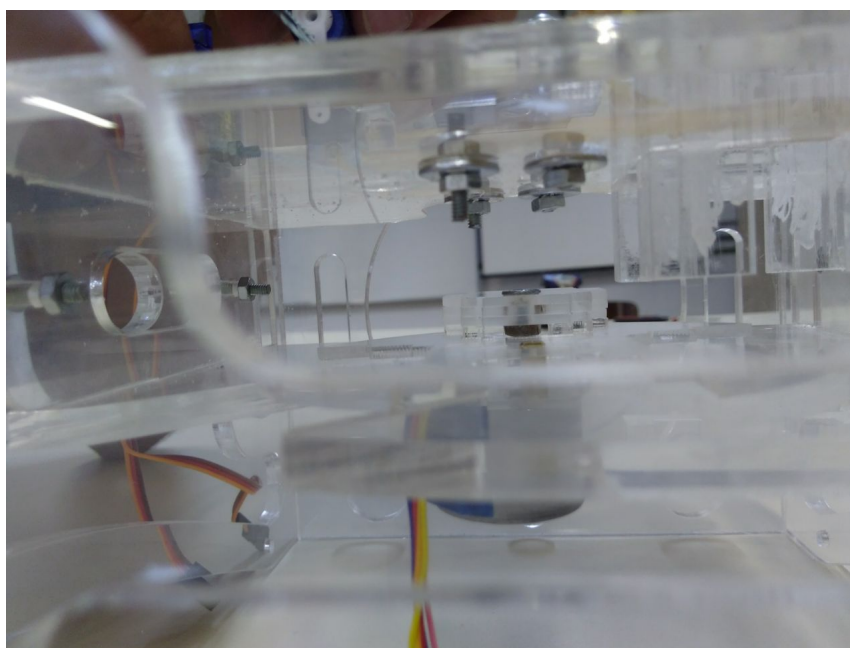


Figura 25: Motor de passo com eixo interligado à mesa giratória

3.4.2 Projeto do Circuito Eletrônico

O circuito eletrônico foi desenvolvido através do software Proteus, utilizando o ISIS para para criação dos esquemas elétricos (Figura 26). Dentre as vantagens desse *software*, destacam-se bibliotecas com diversos modelos e marcas dos principais componentes eletrônicos existentes e a possibilidade de simular o funcionamento.

Como unidade de processamento, foi selecionado o microcontrolador PIC18F2550, de acordo com a necessidade de realizar comunicação USB com a interface gráfica desenvolvida e por apresentar a quantidade de saídas e entradas suficientes para acionamento e controle dos atuadores.

O amostrador automático é alimentado por uma fonte tensão chaveada de 12V e para alimentação do PIC é utilizado no circuito eletrônico o regulador de tensão 7805. Para funcionamento da comunicação USB, há a necessidade do uso de um oscilador externo. Diante disso o esquema eletrônico apresenta um circuito de cristal de 20MHz.

O circuito apresenta todos os requisitos de *hardware* para a comunicação USB com o PIC. O capacitor de 470nF é necessário para que o PIC possa operar o circuito USB interno que contribui com a regulação da tensão USB exigido pela interface USB no PIC de 3,3 V.

No desenvolvimento as pinagens de gravação foram integrados ao circuito com a finalidade de descarregar facilmente o código programado no microcontrolador, facilitando os ajustes necessários.

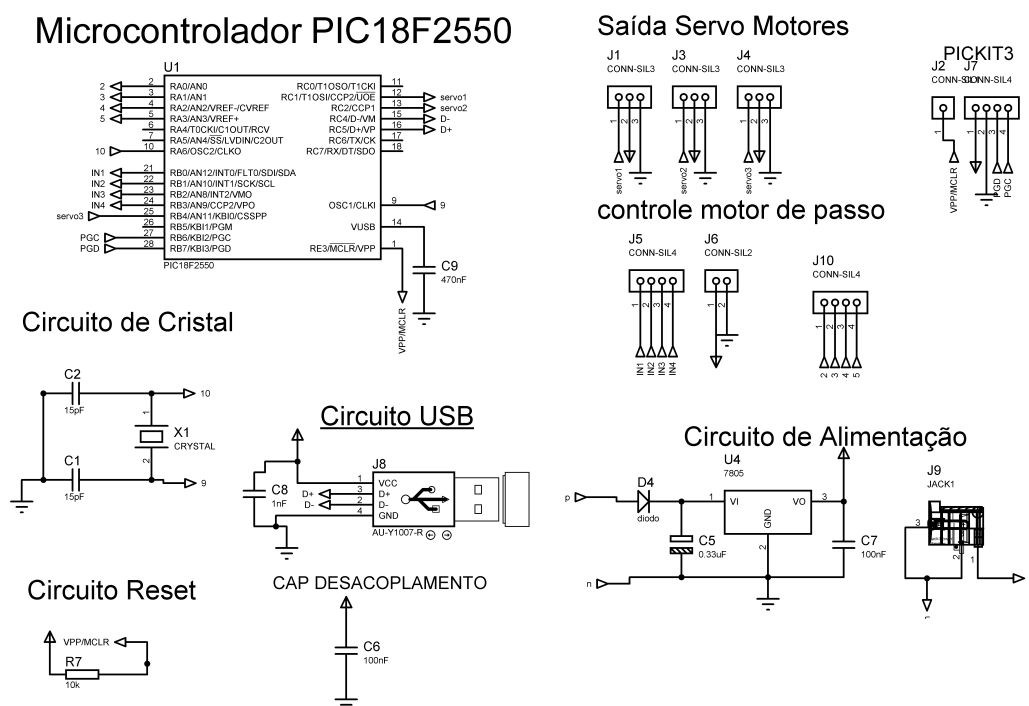


Figura 26: Esquemático do projeto eletrônico.

3.4.3 Projeto da placa de circuito impresso

O ambiente ARES, do Proteus, permite a criação de *layouts* de circuitos impressos a partir dos esquemas projetados no ISIS onde o usuário tem a liberdade de posicionar os componentes eletrônicos de acordo com a suas necessidades e limitações, bem como de gerar os arquivos de saída necessários para posterior confecção dos projetos desenvolvidos utilizando equipamentos apropriados para este fim.

A partir do esquemático da Figura 26, foi desenvolvido o *layout* da placa de circuito impresso que será utilizada como controle central do amostrador automático. A Figura 27 exhibe o *layout* da PCI desenvolvida.

O ARES possui uma ferramenta de visualização 3D dos projetos desenvolvidos. Na Figura 28 é apresentada a visualização em 3 dimensões da placa projetada.

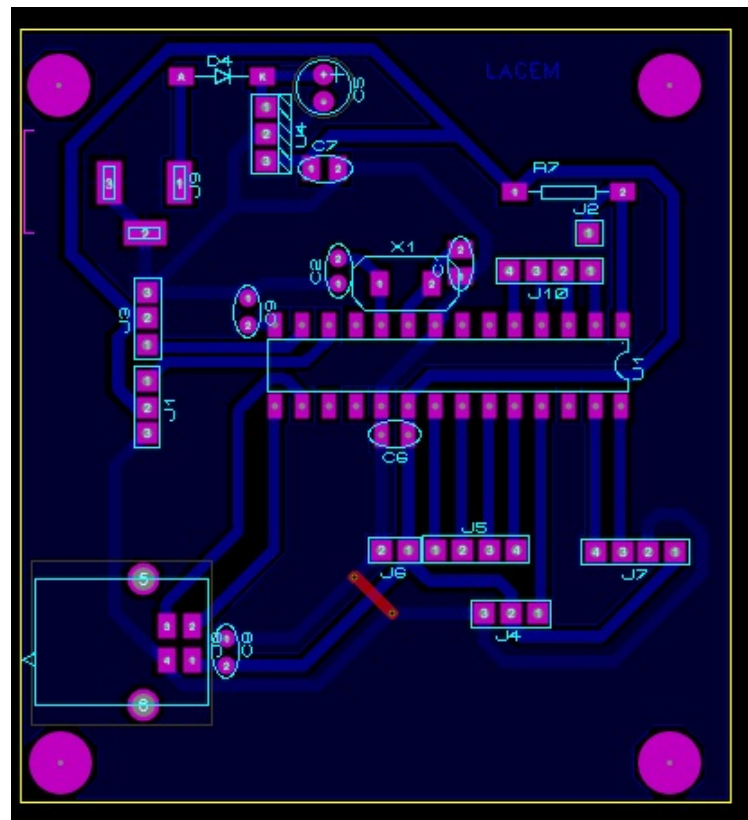


Figura 27: *Layout* da PCI.

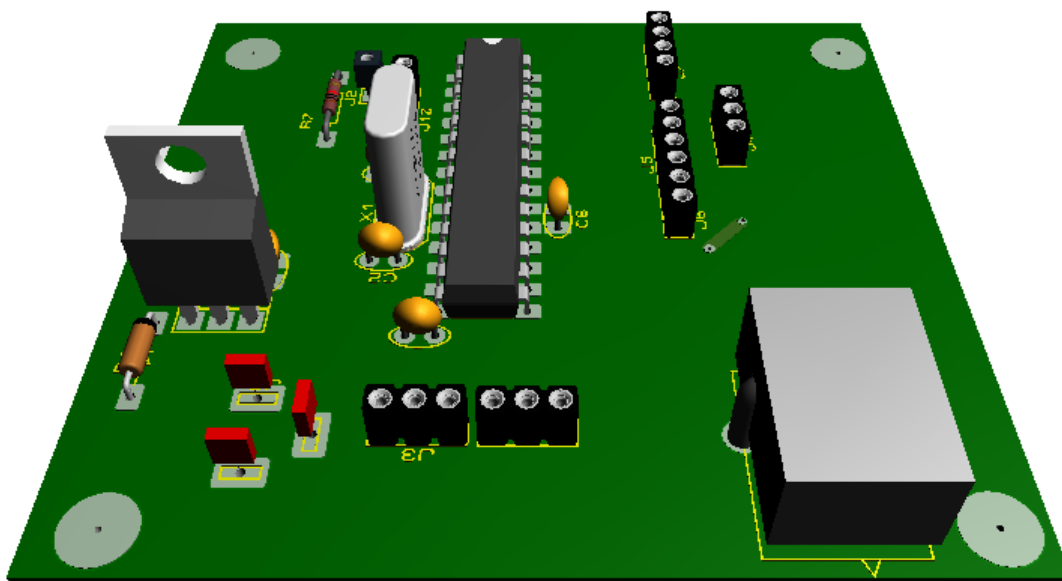


Figura 28: Visualização 3D da PCI.

3.4.4 Placa de Circuito Impresso Desenvolvida

Com o projeto desenvolvido do Ares, foi confeccionada a placa de circuito impresso em uma CNC Router (Figura 29), no Laboratório de Controle e Automação Multiusuário (LabCAM) da Escola de Minas/UFOP. Para isso, houve a necessidade de utilização de um *software* intermediário, já que o código de máquina gerado pelo Proteus não é compatível com o equipamento do laboratório. Para conseguir gerar o código G necessário à confecção das PCIs foi utilizado o ArtCAM 2008.

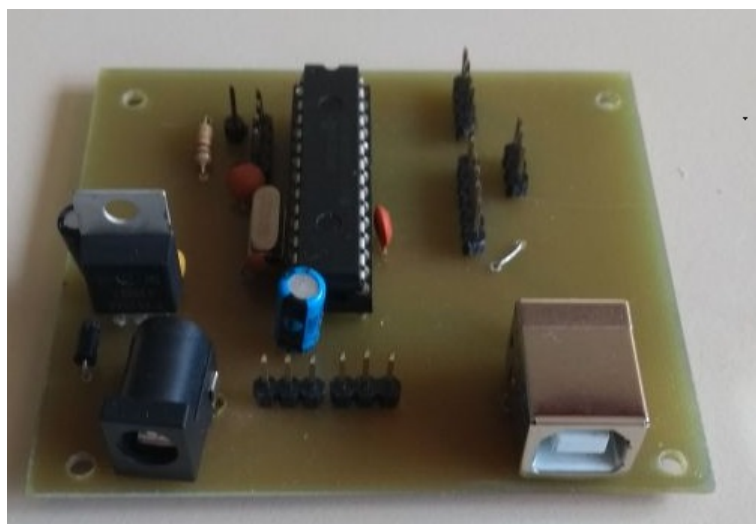


Figura 29: Placa de circuito impresso desenvolvida.

O ArtCAM é um software exclusivo para manufatura que permite aos usuários criar produtos em 3D de alta qualidade de forma fácil a partir de imagens de duas dimensões

ou a partir de vetores (DELCAM, 2005). Por meio dele é possível transformar o layout projetado no Proteus em um algoritmo passível de entendimento para a CNC.

A partir de bitmaps (arquivo de imagem) gerados pelo Proteus, o ArtCAM gera o código G necessário para as máquinas de Controle Numérico Computadorizado (CNC) realizarem a prototipagem dos circuitos eletrônicos. Viabilizando a confecção da placa de circuito impresso para controle e interface de comunicação do sistema embarcado proposto.

4 Interface Gráfica Amigável ao Usuário

Para interface e envio de comandos pelo usuário, foi desenvolvido uma interface gráfica em linguagem de programação C Sharp (C#) por meio do ambiente de desenvolvimento Visual Studio, tornando o sistema interativo com o usuário. Na Figura 30 é exibida a tela principal do sistema de supervisão. Na barra de ferramentas do programa, tem-se a opção “Menu” com as opções conectar e sair, que permite ao usuário, iniciar a comunicação via USB, permitindo o funcionamento do sistema. Após iniciada a comunicação, o usuário pode iniciar o posicionamento de cartuchos através do botão "start". Carreando as próximas amostras por meio do botão "Next Sample".



Figura 30: Tela principal Interface Gráfica .

Os passos de funcionamento do auto amostrador podem ser visualizados em uma segunda tela da interface, desde pronto para iniciar o carregamento de cartuchos até pronto para análise, onde o estado atual fica em vermelho na tela, como apresentado na Figura 31.

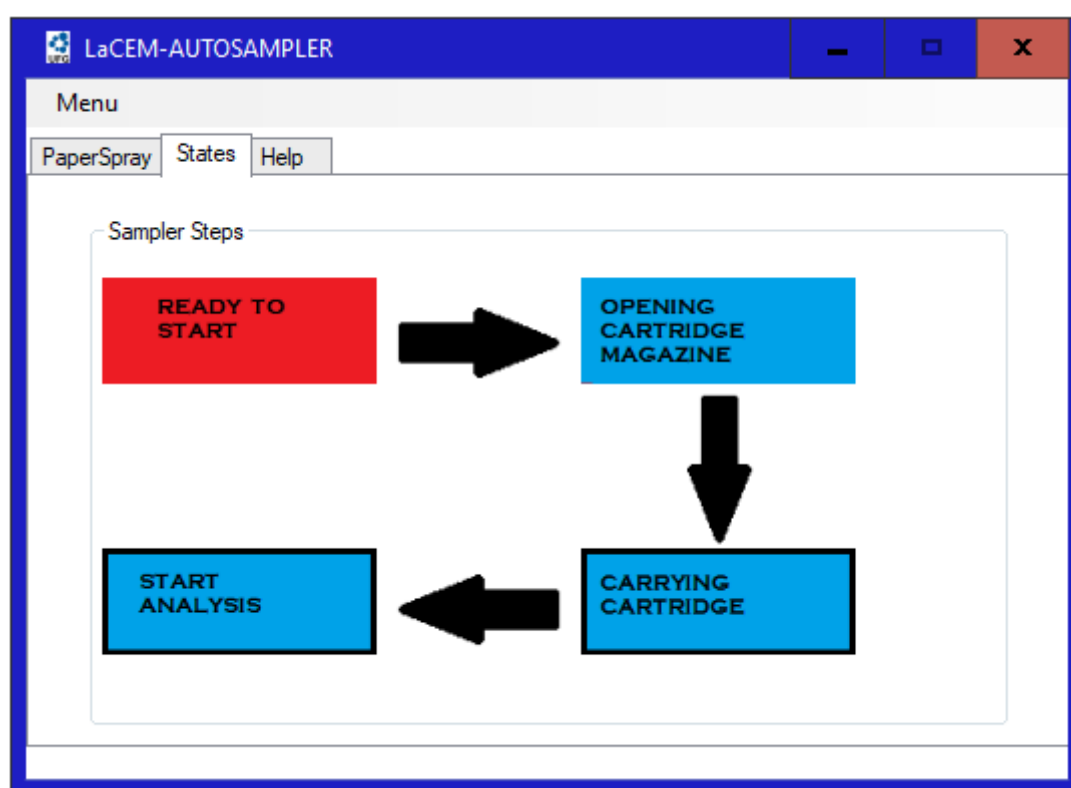


Figura 31: Tela da Interface Gráfica que apresenta os estados do sistema.

5 Fluxograma Firmware do Microcontrolador

Na Figura 32 é apresentado o fluxograma de ações programadas no microcontrolador PIC18F2550 com a finalidade de automatizar o amostrador.

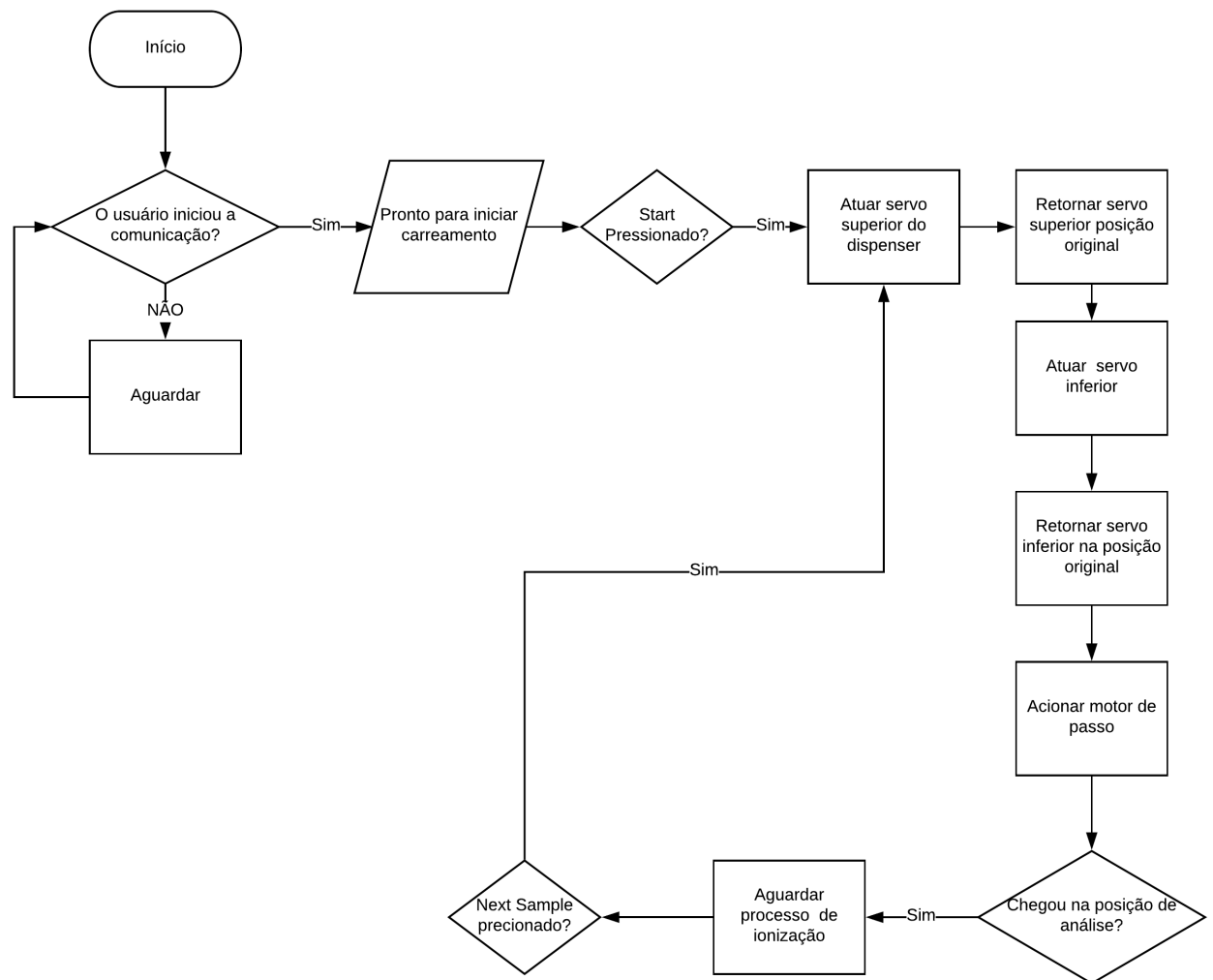


Figura 32: Fluxograma Firmware do Microcontrolador.

Por meio da interface gráfica, o pesquisador inicia a comunicação com o dispositivo, que fica em estado de espera para iniciar o carregamento de amostras a serem analisados. Ao pressionar o botão "start" na interface o processo é iniciado, abrindo as garras superiores para posicionamento na saída do trilho de um cartucho. Ao retornar a garras para a posição inicial ele prende os demais cartuchos empilhados, permitindo dispensar apenas um cartucho por vez. O cartucho é liberado para a mesa giratória a partir da abertura

das garras inferiores que são fechadas na sequência. Dispensado, o cartucho cai na mesa giratória que inicia um movimento circular até posicionar a amostra a ser analisada, permanecendo na posição de análise, aguardando o comando do usuário para carrear a próxima amostra. Ao pressionar o Botão "Next Sample", o sistema volta a atuar nas garras superiores sendo reiniciado o procedimento de amostragem, ao atuar o motor de passo novamente o cartucho anterior é descartado ao passar pelo corte existente na base móvel.

6 Montagem Final

Integrando os sistemas desenvolvidos, foi obtida a montagem final do primeiro protótipo, que será acoplado ao espectrômetro de massas Q-Exactive, fabricado pela Thermo Scientific.

A vista superior do auto amostrador, explicitando a possibilidade de armazenar diversas amostras no trilho de cartuchos é apresentada na Figura 33.

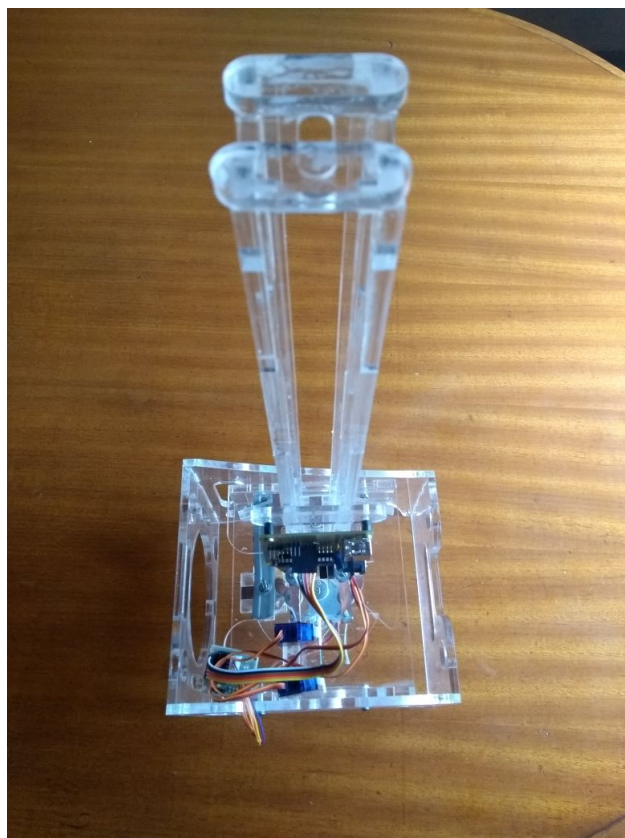


Figura 33: Montagem final do amostrador automático.

Na Figura 34 é apresentada a fixação da placa de circuito impresso que realiza as conexões de alimentação e comunicação do sistema.

Na Figura 35 é apresentada a vista de encaixe do amostrador automático no espectrômetro.

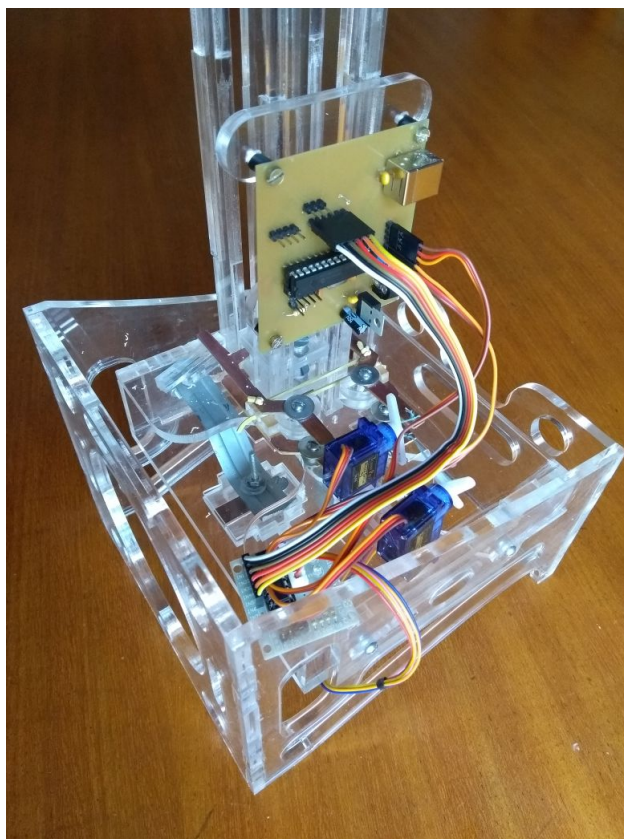


Figura 34: Fixação da PCI .

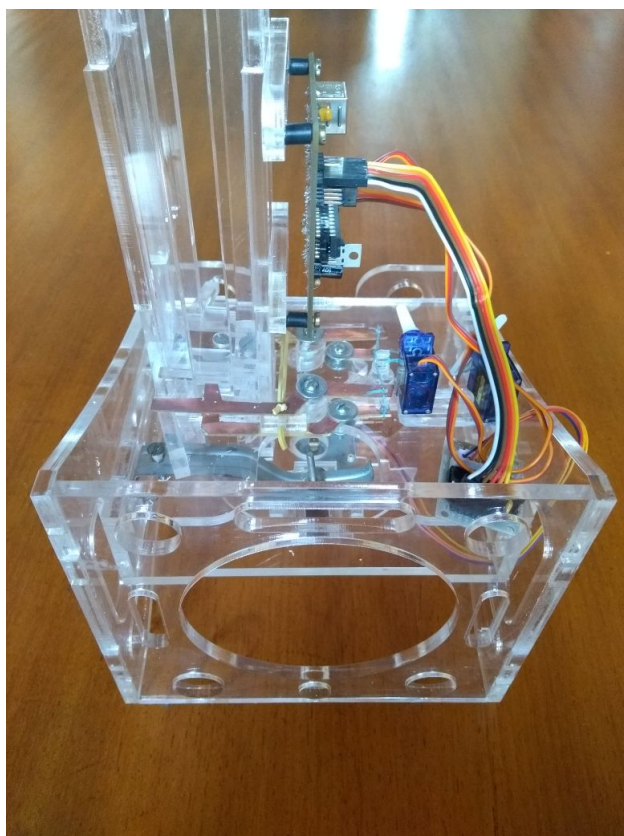


Figura 35: Vista de encaixe no espectrômetro.

7 Conclusão

Neste trabalho foi mostrado o processo de desenvolvimento do protótipo de um amostrador automático que será utilizado durante a técnica de ionização por *paper spray* por um espectrômetro de massas.

Devido ao local onde o espectrômetro está instalado, ainda não foi realizada testes acoplando o sistema desenvolvido ao equipamento do Laboratório de Cromatografia e Espectrometria de Massas da Universidade Federal de Goiás. Porém, com base nos resultados apresentados neste trabalho, acredita-se ter chegado ao objetivo que consistia na construção do primeiro protótipo, uma vez que as características necessárias para realização da técnica foi atingida pelo sistema desenvolvido.

É evidente a necessidade de realização de testes com o espectrômetro com a finalidade de calibrar o sistema desenvolvido, corrigir as imperfeições e desenvolver novos protótipos, até atingir uma versão final, que por apresentar baixo custo, será de grande valia na automatização da montagem das análises utilizando a técnica Paper Spray Ionization (PSI).

Referências

- ACARNLEY, P. **A guide to theory and practice**. London, 2002. Citado na página 19.
- ALBERCI, R. M.; SIMAS, R.; SANVIDO, G.; ROMÃO, W.; LALII, P.; BENASSI, M.; CUNHA, I.; EBERLIN, M. . Ambient mass spectrometry: bringing ms into the "real world". In: **Analytical Bioanalytical Chemistry**. [S.l.: s.n.], 2010. p. 265–294. Citado na página 10.
- ANGNES, D. Introdução ao microcontrolador basic step. **Santa Cruz do Sul/RS**. Disponível em: <http://www.radiopoint.com.br/>, acesso dia, 2003. v. 4, n. 04, p. 2011, 2003. Citado na página 13.
- AXELSON, J. **USB Complete: Everything You Need to Develop Custom USB Peripherals**. Estados Unidos: Madison, 2001. 500 p. Citado na página 17.
- CAO, L.; SCHWARTZ, H. **Oscillation, Instability and Controlo f Stepper Motor**. Netherlands: Kluwer Academic Plubishers, 1999. 383-404 p. Citado na página 19.
- CARVALHO, T. C. de. **Paper spray ionization: análise direta de licores doprocesso de etanol 2G por espectrometria de massas**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Goiás, Instituto de Química, Curso de Pós Graduação em Química, Goiânia, 2015. Citado na página 11.
- CHASE, O.; ALMEIDA, F. Sistemas embarcados. **Mídia Eletrônica. Página na internet:** < www.sbjovem.org/chase >, capturado em, 2007. v. 10, n. 11, 2007. Citado na página 13.
- DELCAM. Arctam pro 8.0 - reference manual systemr. In: . Birmingham (UK): [s.n.], 2005. Citado na página 35.
- HUANG, M. Z.; YUAN, C.; CHENG, S.; CHO, Y.; SHIEA, J. Miniature mass spectrometer. In: **Annual Review of Analytical Chemistry**. [S.l.: s.n.], 2010. p. 43–65. Citado 2 vezes nas páginas 8 e 10.
- JOHNSON, B. **Professional visual studio 2012**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2012. Citado na página 22.
- LIU, J.; WANG, H.; MANICKE, N.; LIN J-M.AND COOKS, R.; OUYANG, Z. Development, characterization, and application of paper spray ionization. In: **Analytical Chemistry**. [S.l.: s.n.], 2010. p. 2463–2471. Citado na página 11.
- MAHONEY, K. D. **Latdict - Latim Dictionary and Grammar Resources**. 2002. Citado na página 8.
- MICROCHIP. Pic18f2455/2550/4455/4550 data sheet. 2017. 2017. Citado 2 vezes nas páginas 14 e 15.

MIYADAIRA, A. N. **Microcontroladores PIC18: Aprenda e Programe em Linguagem C**. São Paulo: Érica, 2005. 200 p. Citado na página 17.

OUYANG, Z.; COOKS, R. G. Miniature mass spectrometer. In: **Annual Review of Analytical Chemistry**. [S.l.: s.n.], 2009. p. 187–214. Citado na página 8.

PEREIRA, F. **Microcontroladores Pic: Programação em C**. [S.l.]: Érica, 2005. Citado na página 16.

SALERMO, C. H.; CAMACHO, J. R.; FILHO, A. S. O. Controle de velocidade do motor de indução trifásico utilizando microcontroladores para aplicações em baixa potência. **III Seminário Nacional de controle e automação**, 2002. 2002. Citado na página 16.

SANTOS, K. O. O software proteus e sua viabilidade no processo de ensino de circuitos elétricos. 2014. Campina Grande, 2014. Citado na página 22.

SOUZA, R. B. **Desbravando o Pic: Baseado no PIC16F84**. [S.l.]: Érica, 1999. 200 p. Citado 2 vezes nas páginas 13 e 14.

TOSHIBA. **TOSHIBA Bipolar Digital Integrated Circuit Silicon Monolithic ULN2003APG,ULN2003AFWG ULN2004APG,ULN2004AFWG ,Datasheet**. [S.l.]: GHD Press, 2010. Citado na página 21.

YANG, Q.; WANG, H.; MAAS, J.; CHAPPELL, W.; MANICKE N.E.; COOKS, R.; OUYANG, Z. Paper spray ionization devices for direct, biomedical analysis using mass spectrometry. In: **International Journal of Mass Spectrometry**. [S.l.: s.n.], 2012. p. 201–207. Citado 2 vezes nas páginas 11 e 12.