

Projeto de Microprocessadores e Microcontroladores Misturador Magnético para o Laboratório de Química da FGA

Josué Bezerra Bonfim Filho, Abhay Caran Das Baraky Dias

Resumo—De acordo com os requisitos necessários para o aprendizado sobre relações de balanceamento de equações químicas através de dados de titulação, este artigo tem o objetivo de desenhar um produto cuja função principal é auxiliar os estudantes da disciplina de Química Experimental a evitar acidentes. O documento explicita o projeto de software e hardware do sistema automatizado de mistura, controle de válvula e detecção do ponto de equivalência entre concentração de ácidos e bases. O produto usa o microcontrolador MSP430G2553 da fabricante Texas Instruments e sensores e periféricos de fabricantes variadas.

Keywords—LDR, microcontrolador, MSP430, display, titulação, misturador, detecção, cor.

I. INTRODUÇÃO

A UnB Gama oferece 5 cursos de graduação, os quais são Engenharia Automotiva, Engenharia Aeroespacial, Engenharia Eletrônica, Engenharia de Energia e Engenharia de Software[10]. Os alunos que ingressam na universidade cursam disciplinas que são comuns a todos até o 3º semestre. Dentre as disciplinas comuns, Química Geral Teórica e Experimental se preocupam em entregar uma abordagem geral dos princípios da Química e suas aplicações, usando exemplos de compostos orgânicos e inorgânicos[9]. Para que o objetivo seja alcançado, os estudantes são submetidos à uma série de procedimentos práticos e testes teóricos.

O experimento de "Balanceamento de uma equação química por meio de dados de titulação" tem como objetivo determinar a concentração exata de soluções aquosas de bases fortes e ácidos fracos. Para isso, os estudantes devem titular a solução presente na bureta com a solução no erlenmeyer através do gotejamento controlado por uma válvula, até que a solução do erlenmeyer mude de cor por conta do indicador ácido-base fenolftaleína. Assim, o experimento exige dos estudantes agilidade e coordenação motora para agitar o erlenmeyer e abrir a válvula da bureta[7].

Encorajados pelo corpo docente da UnB Gama, o projeto da disciplina de Microprocessadores e Microcontroladores visa a construção de um produto que realize a abertura da válvula que será feita por um motor de passo, a mistura das soluções, a qual será feita por um misturador magnético[8] e a detecção da mudança de cor por um sensor para realizar a parada do gotejamento. A fim de controlar o processo, será usado um microcontrolador MSP430G2553.

II. DESENVOLVIMENTO

A. Justificativa e Benefícios

Existe uma dificuldade entre os estudantes da Disciplina de Química Geral Experimental na UnB Gama de realizar o experimento de "Balanceamento de Equações Químicas através de dados de Titulação" devido ao fato que o mesmo exige destreza com o manuseio das vidrarias do laboratório. A falta de habilidade resulta na demora da realização do experimento com repetições, o extravio de material útil e até quebra das vidrarias. Outro aspecto pontual que o laboratório da faculdade enfrenta trata-se da pequena quantidade de equipamentos que implica na limitação da quantidade de pessoas realizando o experimento e dessa maneira a repetição ou erro ao realizar uma execução pode atrapalhar o andamento da aula.

Em conversas com os professores e técnicos, vendo a dificuldade dos estudantes e a falta de recursos para a compra de material para os laboratórios na FGA, o produto será destinado ao uso experimental. Em pesquisas de mercado, o preço de um misturador magnético chega a R\$1300,00.

O maior benefício que o produto traz é a facilidade do uso no ambiente laboratorial, o preço final do produto e sobre tudo a inovação da parada do gotejamento instantaneamente conforme a solução muda de cor. Este equipamento pode reduzir o período da aula e permitir que mais alunos completem o experimento sem demais complicações.

B. Revisão Bibliográfica

1) Experimento - Balanceamento de Equações Químicas Através de Dados de Titulação: A titulometria, ou titulação é um método de análise quantitativa que determina a concentração de uma solução[7]. Dosar uma solução é determinar a sua quantidade por intermédio de outra solução de concentração conhecida. Assim, a titulação ácido-base se torna uma importante ferramenta para análises laboratoriais e é dividida em:

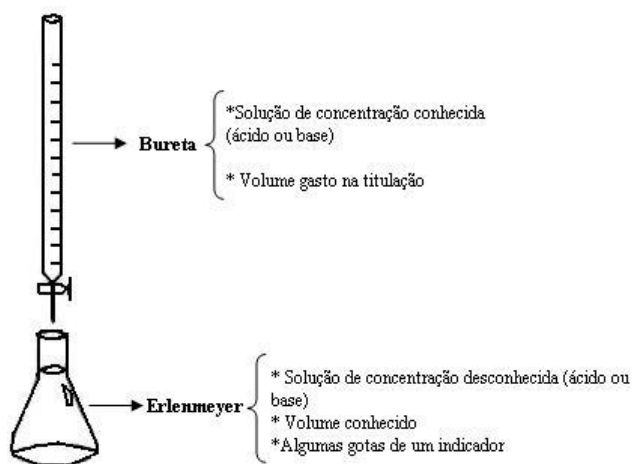
- **Acidimetria:** determinação da concentração de um ácido.
- **Alcalimetria:** determinação da concentração de uma base.

Existem também as substâncias que mudam de cor na presença de ácidos e bases, os quais são os **indicadores ácido-base**. [7] Os indicadores mais usados em laboratórios e as cores dos pontos de viragem estão descritos na tabela I:

Os equipamentos usados habitualmente em uma titulação são uma **bureta** e um **erlenmeyer**, representados na figura 1.

Tabela I. TABELA DOS INDICADORES DE TITULAÇÃO

Indicador	Meio Ácido	Meio Básico
Tornassol	róseo	azul
Fenolftaleína	incolor	vermelho
Alaranjado de metila	vermelho	amarelo
Azul de bromotimol	amarelo	azul

Figura 1. Esquemático de Titulação - Bureta e Erlenmeyer - Fonte <https://brasilescola.uol.com.br/quimica/titulacao.htm>

Ao abrir a torneira da bureta, começa a reação entre ácido e base no erlenmeyer. A titulação termina quando é evidenciada a mudança de cor da solução do erlenmeyer. A coloração obtida dependerá do tipo de indicador usado.

Os estudantes da UnB Gama realizam o experimento de acordo com a metodologia a seguir:

- Pipetar 1mL de vinagre com pipeta volumétrica em um erlenmeyer de 250mL;
- Adicionar 50mL de água destilada com a proveta;
- Acrescentar 3 gotas de solução indicadora de fenolftaleína;
- Titular com a solução preparada anteriormente de NaOH 0,05M até o aparecimento de uma coloração levemente rosa;
- Anotar o volume gasto;
- Realizar a duplicata.

A partir das instruções acima, os estudantes, juntamente com todo o conhecimento teórico, podem calcular a concentração da solução presente no erlenmeyer.

2) **Agitadores Magnéticos - "Magnetic Stirrer"**: Um agitador magnético é um aparelho de laboratório destinado a agitar soluções por meio de uma pequena barra magnética movida por um campo magnético rotativo. Os agitadores magnéticos são utilizados para agitar líquidos ou soluções por longos períodos de tempo. São muito utilizados em trabalhos laboratoriais, mas não podem ser utilizados com líquidos muito viscosos ou se a mistura reacional for heterogênea com grande quantidade de sólidos dispersos[5].

O magnetismo é o fenômeno de atração ou repulsão entre ímãs ou materiais ferromagnéticos e é um dos principais funda-

mentos para que os agitadores magnéticos funcionem. A partir desta atração é possível mover objetos através de superfícies e barreiras que não contenham materiais ferromagnéticos.

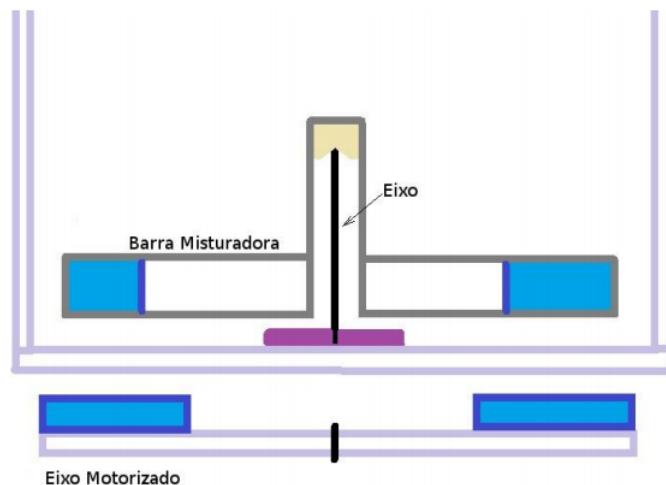


Figura 2. Esquemático de funcionamento interno do agitador magnético.

De acordo com a figura 2, o eixo motorizado possui 2 ímãs em suas pontas. Acima dele, existe uma superfície não magnetizada que separa o eixo da barra magnetizada, que por sua vez, é uma barra feita de material inerte com materiais ferromagnetizados nas pontas. (fonte: misturador magnetico)

3) **Sistema de Detecção Eletrônica de Cores**: Os sistemas de detecção eletrônica de cores são aqueles que utilizam sensores de cor para tomar decisões de maneira autônoma. São sistemas de ampla aplicação na indústria[8]. O sensor de cor consegue detectar fielmente diferenças sutis de cor que geralmente são difíceis de captar com sensores convencionais. Como eles geralmente se baseiam no padrão RGB (Red, Green e Blue), a detecção é pouco afetada por vibrações ou variação de posição.

Os sistemas podem ser usados para separação de objetos por cor, verificação de cor da tampa, etiquetas mal colocadas, detecção de cor para tomada de decisão, detecção de junção em aerossóis ou latas, detecção de presença ou ausência de impressão, detecção de graxa em rolamentos de esfera, verificação de montagem correta, entre outras.

4) **Motor de Passo**: Um motor de passo é um tipo de motor elétrico usado quando algo tem que ser posicionado com precisão e ou rotacionado em um ângulo exato e que convém ao nosso projeto pois a abertura da válvula é pequena e não necessita de grande torque para a perfeita operação. Nesse tipo de motor a rotação do balancete é controlada por uma série de campos eletromagnéticos que são ativados e desativados eletronicamente. Além disso, é utilizado PWM para o controle da velocidade do motor e do tipo de movimento que eles efetuam, que relaciona consumo de energia, intensidade do Torque, velocidade e precisão.

Existem dois tipos de motores de passo: unipolares e bipolares. Em um motor unipolar, a corrente flui em apenas uma direção na bobina já nos bipolares, a corrente flui em ambas

as direções.

Pode-se definir 3 tipos principais de movimentação dos motores de passo:

Wave Drive Operation - este modo realiza a movimentação através de da conexão de uma bobina de cada vez que implica em rotações de 90° por ciclo. É uma opção para aplicações de baixo consumo e que um alto torque não seja necessário;

Full-Step Operation - esta modo também realiza rotações de 90°, porém são utilizadas duas bobinas simultaneamente de forma a intensificar o torque durante a movimentação. Assim, esta se torna uma opção para aplicações que exigem alto torque.

Half-Step Operation - este modo realiza passos de 45° e portanto consegue maior precisão para a movimentação do servo motor e para isto é utilizada uma onda de PWM de 3 (high) por 5 (low) para que ora sejam ligadas apenas uma bobina e ora duas de forma a se completar a rotação. Esta opção requer uma maior número de movimentos para a rotação e portanto consome mais energia e perde velocidade, todavia a resolução do passo aumenta e se torna uma boa para aplicações que demandam grande precisão.

5) **LCD**: Um display é um componente eletrônico onde a imagem é formada pela polarização da luz. Pode ser no formato de 7 segmentos ou matricial. No formato matricial é possível a representação de símbolos. É geralmente controlado por um circuito integrado Hitachi HD44780.

Existem vários tipos de LCD no mercado atualmente e são descritos por AxB, onde A é o número de colunas e B é o número de linhas. Existem também os modelos com e sem back-light, o qual é um conjunto de LEDs no fundo do display que permite que o escrito possa ser lido em ambientes de baixa ou nenhuma luminosidade. Os modelos mais comuns se comunicam através de pinos de I/O de seu microcontrolador chamados de LCDs paralelos. Outros modelos se comunicam em outros protocolos, como os I2C, SPI, etc.

O LCD é formado por "células" onde ficam os caracteres. O display 16x2 possui 32 células e cada célula é composta por uma matriz de 8x5 pixels. A ferraemnta dispõem de 16 portas das quais 8 portas são canais de dados. Entretanto, como o microprocessador utilizado demanda a economia de porta podemos utilizar a função do display para operar com apenas 4 canais.

A alimentação do display demanda 5V para os caracteres e para a Backlight, que é a luz verde de fundo que realça as informações do display. E além disso, também conta com uma porta de contraste para o ajuste da luz e mais 3 portas de controle.

Descrição dos Terminais:

- Vss - GND ou terra;
- Vdd - porta de alimentação 3 5V;
- Vo - Porta para controle do contraste através de uma resistência variável;
- RS - Canal "Register Select" que faz a seleção entre os modos de inserção de caracteres (nível lógico alto) e o modo de inserção de comandos (nível lógico baixo);
- RW - Porta que realiza a seleção entre receber texto para ser escrito no display (nível lógico baixo) e ler

os dados do display para fornecer ao microcontrolador (nível lógico alto);

- E - Canal que permite que todas as operações sejam concluídas e seu funcionamento requer que a porta passe do nível lógico alto para baixo e sem seguida retorne para o alto;
- D0 D7 - Canais de Dados para os modos de comando e de caracteres. Vale notar que ao selecionar a opção de 4 bits são utilizados apenas os bits mais significativos (D4 D7) e os dados são transmitidos seguindo a sequência de 4 bits mais significativos e depois os 4 bits menos significativos;
- A - É a porta de alimentação para a Backlight e é ligada ao 5V;
- k - Canal ligado ao GND para a alimentação do Backlight;

C. Descrição de Hardware

O produto é composto pelos componentes abaixo:

- Um fotoresistor LDR
- Um driver de Motor A4988
- Um motor de passo
- Um cooler
- Ímãs de neodímio
- MSP430FR2433
- Display LCD 16x2
- Botões

1) **LDR - Light Dependent Resistor**: É formado por duas células fotocondutivas com resposta espectral de comprimento de onda similar ao do olho humano. A resistência da célula cai de acordo com o incremento da intensidade luminosa captada por ele.

A sensibilidade de um fotodetector é a relação entre a queda de intensidade de luz captada pelo dispositivo e o sinal de saída. No caso do LDR, a relação é entre a incidência de luz, dada em [LUX], com a resistência da célula, dada em [Ω]. Esta relação pode ser visualizada de maneira efetiva na figura 3.

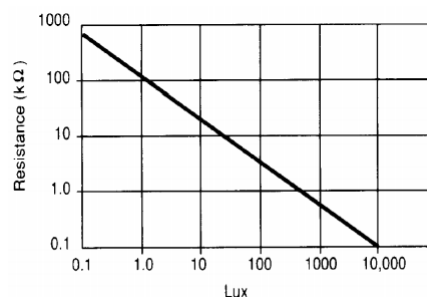


Figura 3. Resistência do LDR em função da intensidade luminosa

Como um olho humano, a sensibilidade relativa de uma célula fotocondutora é dependente do comprimento de onda da luz incidente. Cada tipo de material de fotocondutores tem uma curva característica para a resposta relativa da fotocélula

contra o comprimento de onda da luz incidente. A curva do LDR pode ser observada na figura 4.

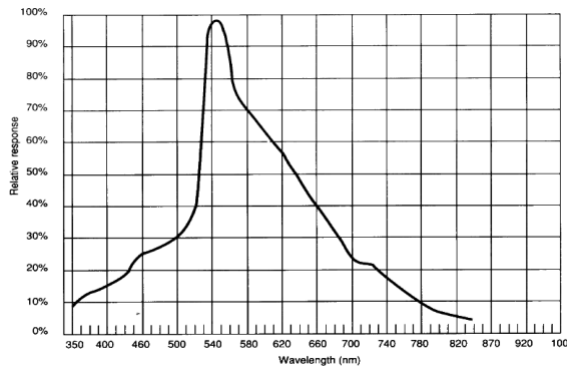


Figura 4. Curva de Resposta Relativa do LDR em função do comprimento de onda da luz incidente

O LDR pode ser implementado em uma série de aplicações. Algumas delas podem ser conferidos na lista a seguir.

- Controle de Exposição de Câmeras
- Máquinas Fotocopiadoras (Xerox)
- Equipamento de colorimetria
- Sistemas de Detecção de Cor
- Controle de Luz Noturna
- Controle de Iluminação Pública
- Sensor de Posição

Vejamos então algumas características elétricas na tabela II.

Tabela II. CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS DO LDR

Parâmetro	Condição	Máx	Típ	Mín	Unidade
Resistência	1000 LUX	-	400	-	Ω
	10 LUX	-	9	-	k Ω
R de escuro	-	-	1	-	M Ω
C de escuro	-	-	3,5	-	pF
Voltagem AC/DC	-	-	320	-	V max
Corrente	-	-	75	-	mA
Potência	-	-	100	-	mW
Temperatura de OP	-	-60	-	+75	°C

2) **Cooler:** Este projeto utilizará um PC cooler genérico para rotacionar os ímãs e realizar o agitador magnético. O equipamento em si é um motor DC de 12 volts e sem necessariamente o fio indicador de rotações por minuto.

3) **Driver de potência ULN2003:** Este driver, presente na figura 5, permite que o microcontrolador realize a operação do cooler eo controle do motor de passo. Ele possui 7 canais de operação que nada mais são um conjunto de portas inversoras que utilizam potência maior que a do MSP430. O driver possui também uma porta de alimentação e outra para o terra. Esta ferramenta consegue liberar no máximo 50V e receber 30V, além de transferir até 500mA de corrente para motores e outros periféricos.



Figura 5. Drive de Potência ULN2003

4) **Motor de Passo 26BYJ-48:** O motor de passo utilizado no nosso projeto é o motor unipolar 26BYJ-48, mostrado na figura 6, com alimentação de 5V e com 64 passos, portanto possui um ângulo de passo de 5.625°. Sua frequência é de 100Hz, possui 4 bobinas magnéticas e sua alimentação é interligada internamente e por isso possui apenas 1 fio de alimentação Vcc.

Este projeto utilizará a configuração de meio passo, a qual necessita energizar as bobinas de 8 formas diferentes para realizar um ciclo completo. Dessa forma, o grupo realizou ensaios para determinar quantos ciclos de 8 passos são necessários para realizar uma volta completa.



Figura 6. Motor de Passo 26BYJ-48

5) **Display LCD 16x2:** Este Dispositivo é utilizado para informar o usuário quanto ao início e finalização do processo mecânico da titulação. O modelo usado é o ITM-16032BSTL da INTECH LCD GROUP, ilustrado na figura 7.

O modelo possui os pinos 1 e 2 para alimentação do LED BACKLIGHT+ e LED BACKLIGHT- respectivamente. Os pinos 3 e 4 são a alimentação do display. O pino 5 controla o contraste do display. O pino 6 é o RS ou Register Select. O pino 7 é o Read/Write select e o mesmo deve ser aterrado. O pino 8 é o pino de Enable do Read/Write. Os pinos 9 a 16 são os DATA BUS. Para este projeto, a comunicação será feita por nibble, então apenas 4 pinos serão usados e estes são os pinos 13 a 16.



Figura 7. LCD ITM-16032BSTL

6) *Ligação com a MSP430*: A figura 8 nos mostra um conceito de ligação entre os periféricos (sensores e motores) com a MSP430G2553. Espera-se que sejam usados 14 portas da MSP430. No ponto de controle anterior, esperava-se que fossem usadas 22 portas, então, com o aperfeiçoamento do projeto, foram reduzidas 8 portas.

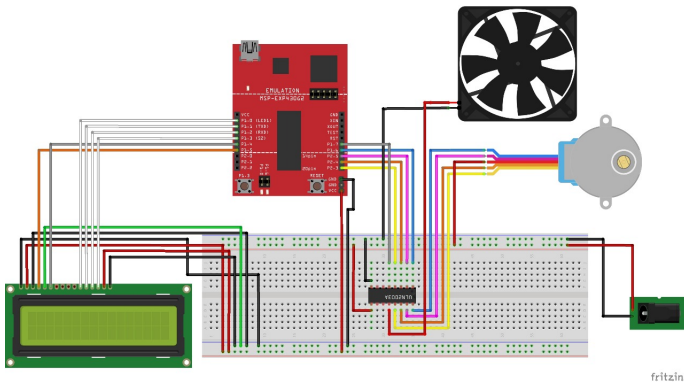


Figura 8. Ligação dos periféricos com a MSP430

D. Teste de detecção do ponto de virada pelo LDR

Atualmente está provado que a cor luz branca (diferente do pigmento branco) é a soma de todas as luzes do espectro visível. Este conceito foi afirmado primeiramente por Isaac Newton, através do experimento do prisma, onde a luz, ao passar pelo prisma, se decompõe em uma faixa de cores, como nos mostra a figura 9.

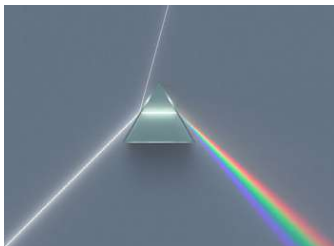


Figura 9. Luz branca passando pelo prisma e se decompondo nas cores do espectro visível

No começo do século XX, o físico alemão Max Planck (1858-1947), provou, através de sua teoria de radiação de corpo negro que a luz branca é a soma de todas outras luzes-cor, como nos mostra a equação 1.

$$E(\lambda) = \int_{400nm}^{700nm} \frac{2\pi h \lambda^3}{c^2 (e^{\frac{hc}{\lambda T}} - 1)} d\lambda \quad (1)$$

Onde:

- E - emitância espectral
- h - Constante de Planck [$6,62 \cdot 10^{-34} m^2 kg/s$]
- λ - comprimento de onda [nm]
- e - contante de Euler [adimensional]
- k - número de onda [rad]
- T - temperatura [K]
- c - velocidade da luz $\approx 2,98 \cdot 10^8$ m/s

Tendo em vista estas informações, podemos afirmar que quando a luz branca passa por um objeto translúcido colorido, todas as outras cores luzes são filtradas, exceto a cor luz referente ao objeto translúcido. Isso significa que a emitância espectral diminui e portanto, a quantidade de luz que chega no observador é menor que a quantidade que chegaria se não existisse esse filtro.

Essas informações é crucial para que o teste de detecção do ponto de virada da titulação. O esquemático da figura 10' nos mostra como o funcionamento da detecção de ponto de viragem deverá funcionar.

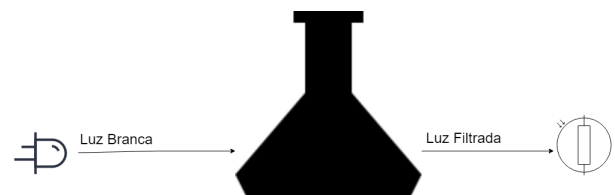


Figura 10. Diagrama de Funcionamento da Detecção do Ponto de Viragem pelo LDR

De acordo com o diagram da figura 10, um LED de cor branca está posicionado em um dos lados do erlermeyer com a solução incolor de NaOH. Uma vez que que o ponto de virada é atingido, a solução agora presente no erlenmeyer funciona como um filtro cor-de-rosa, impedindo que todas as outras luzes-cor cheguem ao LDR, fazendo com que a resistência da célula aumente.

Para que a MSP430 saiba que o ponto de virada ocorreu, será implementado um divisor de tensão, como nos mostra a figura II-D.

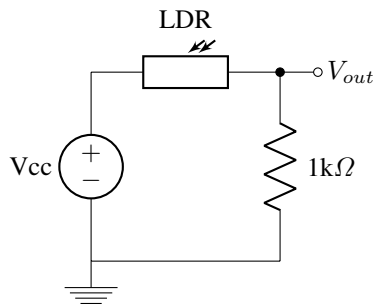


Figura 11. Circuito Divisor de Tensão do LDR

O MSP430 usará seu conversor analógico-digital de 10bits embutido, o AC10 para que o mesmo seja capaz de enviar a informação de parada para os outros periféricos.

E. Descrição de Software

1) **Diagrama de Blocos:** A figura 12 ilustra o diagrama de blocos do software a ser desenvolvido.

Vimos nela que, enquanto o botão de início não é pressionado, a programa fica preso no estado de espera. Assim que é pressionado o botão de início, o mesmo faz o programa entrar no estado que liga o misturador, setando a flag mixer para nível alto.

Na função que liga o misturador o programa então espera 2s para que a flag início seja setada. Isto acontece para que o mixer tenha tempo hábil para iniciar e estabilizar na velocidade de rotação. Com a flag início setada, abrimos a torneira da bureta dando uma quantidade "n" de passos para que o gotejamento aconteça. Este número de passos ainda será definido.

Assim, o LDR espera até que o ponto de viragem seja alcançado. Uma vez que o ADC10 detectou mudança na voltagem do divisor de tensão do LDR, a flag detecção é setada e assim o programa manda instruções para fechar a bureta e desligar o misturador, da mesma forma que fez para ligá-los.

Para finalizar, o LCD informará o usuário quando o mesmo poderá repetir o procedimento.

2) **Teste do Motor de Passo:** O programa primeiramente define as saídas da porta P1 como:

- P1.0 para a bobina 1
- P1.1 para a bobina 2
- P1.2 para a bobina 3
- P1.3 para o botão da MSP430
- P1.4 para a bobina 4

Como variáveis globais foram definidos o inteiro sem sinal $i = 0$ e um inteiro direção = 0;

O programa define também uma variável para todas as bobinas, chamada COILS.

O clock do sistema é definido em 1MHz. O programa define P1.3 como entrada e as demais ports de P1 como saídas. Também é habilitado o resistor de pull-up o botão. O programa também utiliza de interrupção do botão.

O timer A é configurado utilizando o SMCLK dividido por 1 no modo up e que habilita interrupção do timerA.

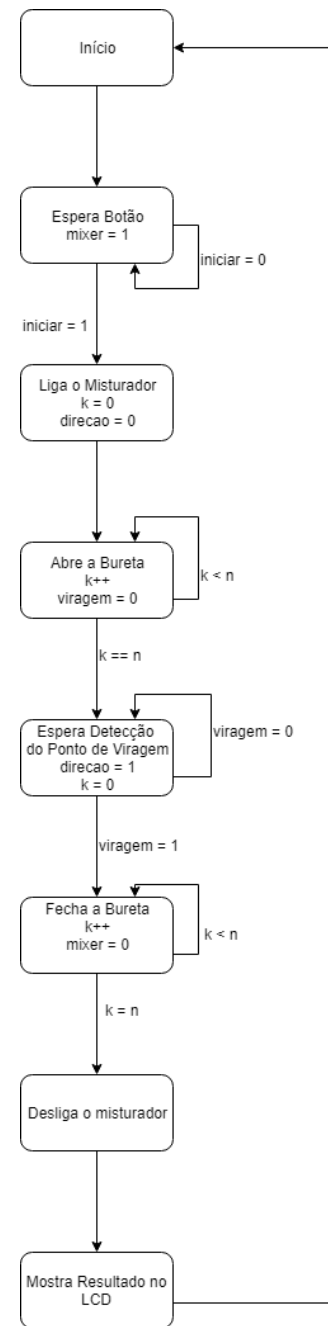


Figura 12. Diagrama de Blocos do Software do Produto

Na função da interrupção do timerA, a variável global i realiza o controle de qual bobina será energizada. Se i é zero, a bobina 1 é energizada, as outras bobinas não são e se a direção = 0, $i = 7$, senão $i++$. Se $i = 7$ as bobinas 1 e 4 são energizadas, enquanto as demais não são e se direção = 0, i é decrementado, senão $i=0$. Se $i = 6$ apenas a bobina 4 é energizada e se direção for = 0, $i++$, senão $i--$. Assim, seguindo a lógica de energizar a bobina n , no próximo passo, energiza a bobina n e a bobina $n\pm 1$, até que $n \leq 1$ A flag direção

seleciona se a próxima bobina energizada será a bobina $n-1$ ou a bobina $n+1$.

Na função de interrupção do botão, se o botão é pressionado, a flag de direção é invertida, ou seja, se era 0, recebe 1, se era um recebe 0.

3) **Misturador:** O mesmo programa que liga o motor de passo, também liga o misturador, com apenas uma diferença. A porta P1.6 é utilizada para a saída do timer A. Logo, o misturador fica ligado enquanto o timer A estiver funcionando.

4) **Display LCD 16x2:** Para economia de portas, o modo de comunicação escolhido foi o de 4 bits. Para a comunicação via software, durante a pesquisa sobre o funcionamento do display, foi achada uma biblioteca pronta em C que realiza a comunicação de forma eficaz.

Tendo em vista que o projeto tem como objetivo servir a comunidade acadêmica da FGA, o mesmo deverá ser o mais intuitivo possível. Portanto, o display LCD desempenhará o papel importantíssimo de guiar o usuário nas etapas do processo. De acordo com a figura 13, podemos entender como o LCD servirá de apoio ao usuário.

A porta P1 foi setada inteiramente como saída, ou seja, $P1DIR = 0xFF$; e todos os pinos foram resetados, ou seja, $P1OUT = 0x00$; . Na porta P2, o bit 3, referente ao botão na MSP430FR2433 foi setado como entrada, ou seja $P2DIR \& \sim BTN$; . O Resistor de pull-up/down foi habilitado com $P2REN$ or $P2REN, BTN$; e foi setado como resistor de pull-up a partir de $P2OUT$ or $P2REN, BTN$; .

Então o LCD é inicializado com `lcd16x2_Init()`; O programa então realiza a escrita no LCD de uma string e então, se o usuário apertar o botão, o programa realiza outra escrita no LCD e fica preso no laço infinito.

5) **Deteção de mudança de cor com o LDR:** O programa define o bit1 para a entrada de referência do conversor AD e define o LED1 como o bit0 e o LED2 como o bit6. Existe também uma variável que seta os dois leds ao mesmo tempo, ou seja $LEDS = (LED1|LED2)$.

Na função main, desabilitamos o watchdog timer e setamos o clock do sistema para 1MHz, ou seja, $BCSCTL1 = CALBC1_1MHZ$; e $DCOCTL = CALDCO_1MHZ$; Então os leds são setados para a porta P1 como saída.

Para a configuração do ADC10, usaremos como a fonte de referência $V^+ = V_{cc}$ e $V^- = V_{ss}$, usaremos também o 4 períodos de clock para fazer aproximações sucessivas com o conversor ligado o tempo todo. Usaremos para a fonte de conversão a porta P1.1. Selecionamos a entrada analógica A1, selecionamos a divisão de clock por 1, escolhemos o subsystem master clock como a fonte de clock, usamos a conversão única por canal único e toda vez que uma conversão é solicitada o bit referente ao início da conversão, $ADC10SC$ será setado.

Entramos então em um loop infinito, em que iniciamos uma conversão, esperamos a mesma ficar pronta e se a voltagem no LDR for menor que o threshold do ponto de viragem, o LED1 pisca, senão, ele não pisca.

6) **Produto Final:** O programa se inicia esperando com que o usuário pressione o botão. Enquanto o usuário não aperta o botão, uma mensagem "PRESSIONE O BTN PARA INICIAR" é mostrada no display.

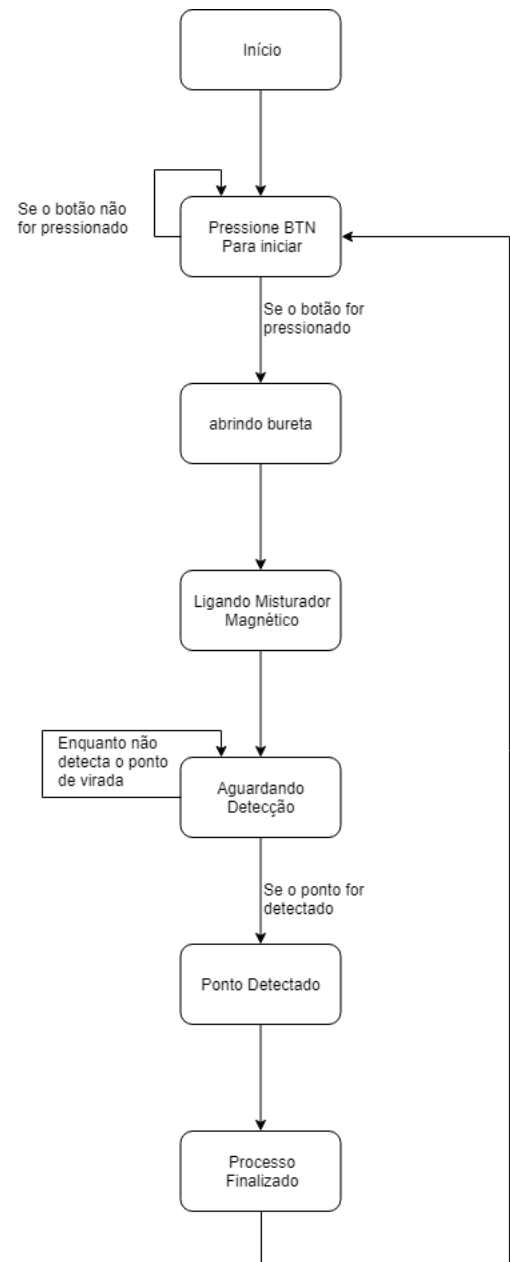


Figura 13. Diagrama do Display LCD 16x2

Ao pressionar o botão, o motor de passo realiza 200 passos e guarda sua posição. O timerA é inicializado e o misturador magnético começa a rodar. O display mostra para o usuário "AGUARDANDO DETECÇÃO". Então o conversor analógico-digital fica esperando para que a solução atinja o ponto de virada.

Uma vez atingido o ponto de virada, o motor anda 200 passos para a direção oposta, o timerA é parado, fazendo com o misturador magnético também pare e o display mostra "PROCESSO FINALIZADO". O usuário pode repetir o processo pressionando o botão RESET.

Tabela III. TABELA DOS VALORES DE RESISTÊNCIA DO LDR PARA O TESTE SEM ANILINA

Sem Anilina	M1	M2	M3	M4	M5	M \pm erro
	526 Ω	531 Ω	538 Ω	544 Ω	546 Ω	537 \pm 7,58 Ω
Com Anilina	M1	M2	M3	M4	M5	M \pm erro
	1000 Ω	955 Ω	948 Ω	1034 Ω	1081 Ω	1003,6 \pm 49,76 Ω

III. RESULTADOS E ANÁLISES

A. Objetivos

O objetivo geral se baseia na construção de um produto que realize a titulação automática das soluções ácidas e alcalinas a fim de auxiliar os estudantes, técnicos e professores do laboratório de química da UnB Gama e oferecer alta precisão durante o gotejamento. Ademais, o projeto busca realizar as funcionalidades dos aparelhos de alto custo do mercado utilizando periféricos baratos.

B. Resultados Esperados

A partir das premissas do projeto, o grupo pretende:

- Realizar a abertura controlada da torneira da bureta;
- Misturar as soluções ácida e alcalina através de um agitador magnético;
- Detectar o ponto de viragem através de um sensor de cor;
- Informar os usuários quanto ao início e o término do procedimento de titulação.

C. Comunicação - Componentes e MSP430G2553

1) **Display LCD 16x2:** Durante as pesquisas sobre o funcionamento e comunicação com microcontroladores, foi encontrada uma biblioteca pronta para o MSP430FR2433, a "lcd16x2_msp43x.h", que realiza comunicação de maneira eficaz. Sua vantagem é que ela não é para o Energia e sim para a linguagem C.

A partir disso, foi montado uma sequência que mostra como o LCD ajudará o usuário, apresentando as frases de instrução para o usuário.

2) **LDR para Detecção do Ponto de Viragem:** O LDR será o substituto definitivo para o sensor TCS3200, uma vez que o fotoresistor se mostrou eficiente na detecção do ponto de viragem de acordo com as premissas teóricas apresentadas na seção de Desenvolvimento.

O teste foi feito da seguinte maneira: Com o Erlenmeyer cheio de qualquer solução translúcida, foi colocada em um lado e do outro lado, foi colocado o um LDR. As figuras 14 e 15 nos ilustram como foi feito a aquisição dos dados. Para simular o comportamento da solução quando há equivalência de concentração de ácidos e bases foi usado anilina de cor vermelha com baixíssima concentração.

A Tabela III apresenta os valores de resistência do LDR para o teste com o sem anilina.

Os valores de erro foram encontrados pelo métodos dos mínimos quadrados para ajuste de medidas.

Com esses valores médios encontrados, podemos então verificar que o circuito da figura II-D acontece em dois

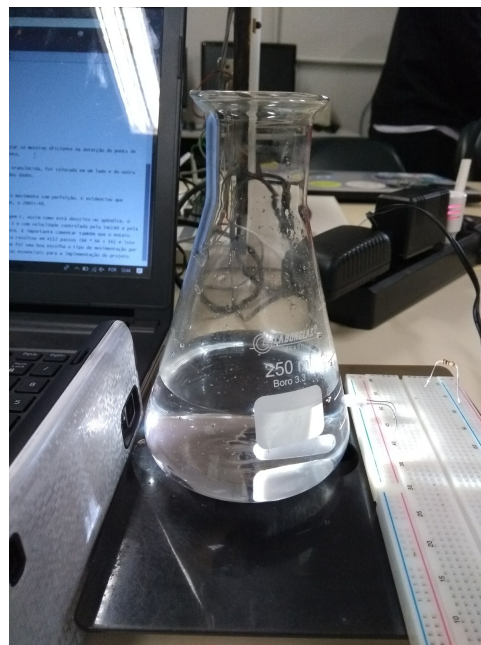


Figura 14. Aquisição dos Valores do LDR sem anilina

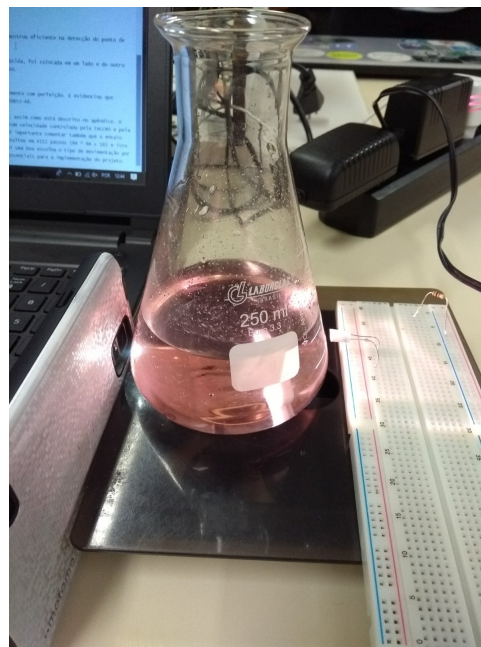


Figura 15. Aquisição dos Valores do LDR com anilina

momentos. O primeiro é quando o LDR assume o valor de $R = 537 \pm 7, 58$. O segundo é quando acontece a detecção do ponto de virada e o LDR assume o valor de $R = 1003, 6 \pm 49, 76$.

Assumindo que a alimentação da MSP430G2553 é de 3,3V, teremos um divisor de tensão também em dois momentos. A tensão de saída, de acordo com a figura II-D é a tensão sobre o resistor de $1k\Omega$. Devemos sempre assumir o pior caso, ou seja, quando não há a detecção do ponto de virada, o LDR deve assumir o maior valor possível e quando há a detecção, o menor possível. As equações 2 e 3 nos indicam a tensão de saída do circuito de detecção.

$$\begin{aligned} V_{out1} &= V_i \cdot \frac{1k\Omega}{1k\Omega + 545\Omega} \\ V_{out1} &= 3,3 \cdot \frac{1000}{1545} \\ V_{out1} &= 2,13V \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} V_{out2} &= V_i \cdot \frac{1k\Omega}{1k\Omega + 953,84\Omega} \\ V_{out2} &= 3,3 \cdot \frac{1000}{1953,84} \\ V_{out2} &= 1,69V \end{aligned} \quad (3)$$

Sabemos que o Conversor Analógico Digital da MSP430G2553 é de 10 bits. Logo, podemos dividir o parâmetro chave em 2^{10} . Como o parâmetro chave é o VCC = 3,3V, podemos então fazer uma regra de 3 para cada situação. As regras de 3 estão nas equações 4 e 5.

$$\begin{aligned} \frac{3,3}{2,13} &= \frac{1024}{x_2} \\ 3,3x_1 &= 1024 \cdot 2,13 \\ x_1 &= \frac{1024 \cdot 2,13}{3,3} \\ x_1 &= 671 \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{3,3}{2,13} &= \frac{1024}{x_2} \\ 3,3x_2 &= 1024 \cdot 1,69 \\ x_2 &= \frac{1024 \cdot 1,69}{3,3} \\ x_2 &= 525 \end{aligned} \quad (5)$$

Os valores de x_1 e x_2 são os parâmetros necessários para que o sistema conclua seu trabalho, a partir do momento que haja a detecção do ponto de virada.

3) **Motores:** O motor de passo entrou em funcionamento através da plataforma Energia e realizou o movimento com perfeição. E evidenciou que podemos configurar a direção de rotação, a velocidade e o torque do motor adquirido, o 26BYJ-48.

Ademais, o motor entrou em funcionamento agora pelo Code Composer Studio na linguagem C, assim como está descrito no apêndice. O teste do motor implementou a rotação

com direção controlada pelo botão da porta P1.3 e com velocidade controlada pela TACCR0 e pela frequência do SMCLK, pois eles ditam a frequência em que a interrupção do TA acontece. É importante comentar também que o ensaio sobre a quantidade de ciclos de 8 passos necessários para completar 1 volta completa resultou em 4112 passos ($64 * 64 + 16$) e isto implica em uma resolução de 0,07 graus por passo. Desta forma, ficou evidenciado que foi uma boa escolha o tipo de movimentação por "Half-step", pois está com grande resolução e torque mais forte, duas características essenciais para a implementação do projeto.

Por fim, o motor de passo conseguiu desempenhar o seu objetivo e fechar e abrir a válvula da bureta com precisão adequada, garantindo uma vazão de gotejamento classificada como ótima para o experimento pelos técnicos do laboratório.

4) **Misturador Magnético:** O Cooler foi implementado com sucesso através do modo de captura do Timer A da porta P1.6 que gera um sinal de PWM com ciclo de trabalho ditando sua velocidade. A velocidade calibrada pelo grupo também foi analisada pelos técnicos do laboratório de química e foi classificada como ideal para muitos experimentos, inclusive o experimento de neutralização ácido base.

Uma vez que o cooler está funcionando, é necessário que a estrutura do misturador magnético seja montada. Para a excitação da barra misturadora que fica dentro do Erlenmeyer, foram fixados dois ímãs de neodímio na parte superior do cooler. É necessário cuidado nesta hora, pois todo ímã possui polo sul e polo norte, assim como a barra misturadora. Deve-se então, identificar os polos da barra e dos ímãs para que a fixação seja feita. Para a fixação, foi usado cola instantânea. Para que o Erlenmeyer não encoste nos ímãs, foi colocada uma base de acrílico no cooler.

Feitos todos os passos supracitados, colocou-se o cooler para funcionar e obteve-se sucesso.

D. Estrutura

Para que o controle de gotejamento fosse realizado, uma estrutura 3D foi elaborada e impressa 3D. Ela foi pensada para que os usuários pudessem retirá-la de maneira fácil e que a mesma ficasse presa em um suporte.

Podemos ver na figura 16, a torneira da bureta, para a qual foi pensada o adaptador para o controle de gotejamento.

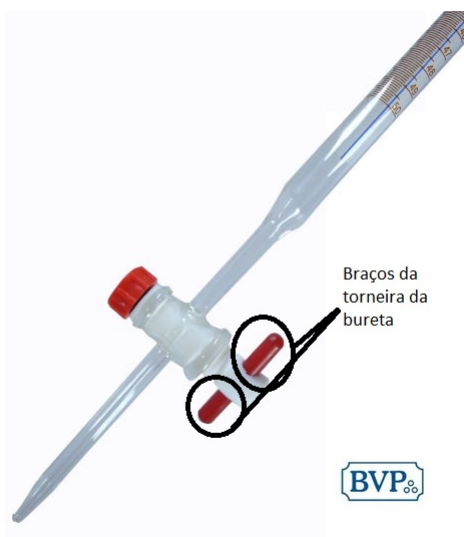


Figura 16. Torneira da Bureta, em destaque os braços da torneira

A figura 17 nos mostra o adaptador A, o qual é conectado à torneira da bureta, prendendo seus braços.

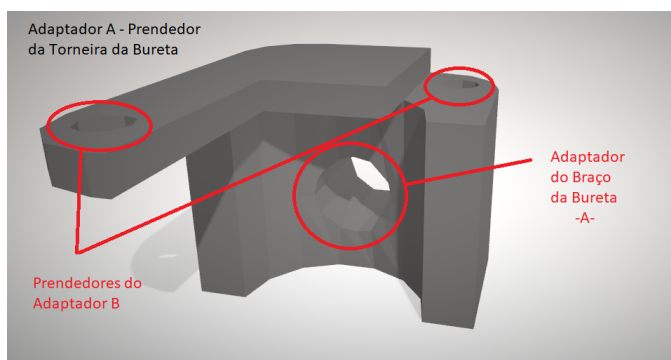


Figura 17. Adaptador A - Prendedor dos Braços da Bureta

Em destaque na figura, podemos ver um buraco onde passará o braço da bureta. Este adaptador tem uma peça gêmea. Na parte superior do adaptador, podemos ver os buracos dos prendedores do adaptador do motor, mostrado pela figura 18.

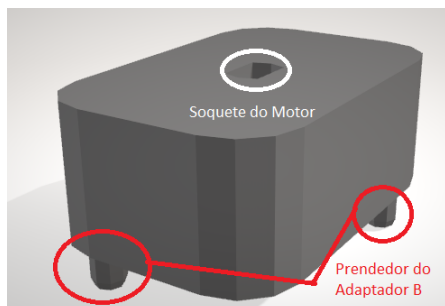


Figura 18. Adaptador B - Adaptador da Bureta com o Motor

Podemos ver na figura 18 em destaque na parte inferior

os pinos que fazem o travamento das peças do adaptador A. Na parte superior está em destaque o soquete para o eixo do motor. A figura 19 nos mostra então a caixa onde o motor ficará preso.

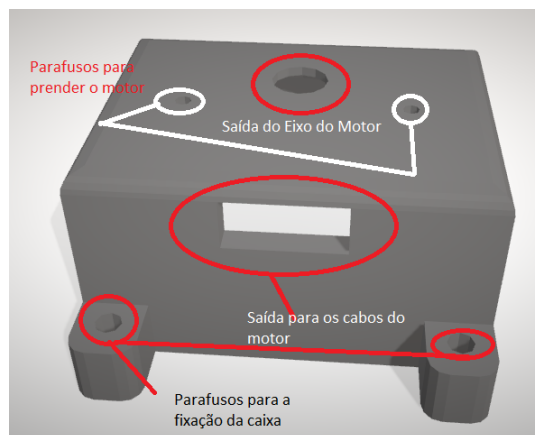


Figura 19. Adaptador C - Caixa suporte do motor de passo

A figura então nos destaca, em vermelho a saída do eixo do motor e em branco as saídas para os parafusos de fixação do motor na caixa. Na região central da figura, podemos observar a saída para os cabos de conexão do motor e na parte inferior a saída dos parafusos de fixação da caixa. A figura 20 nos mostra a tampa da caixa de suporte do motor.

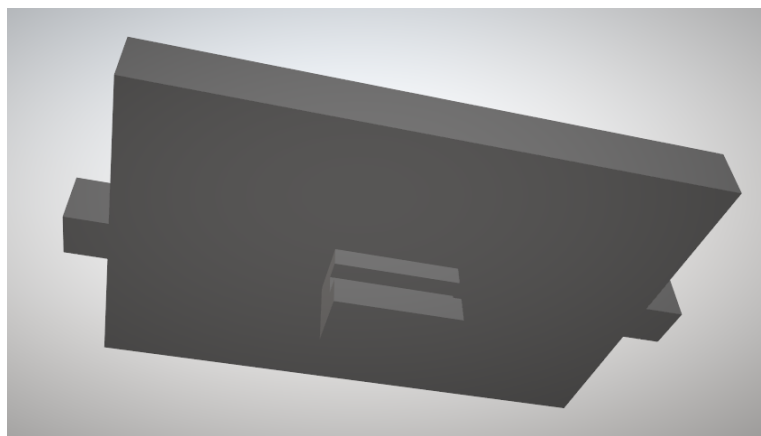


Figura 20. Adaptador C - Caixa suporte do motor de passo

Podemos ver então o CAD dos adaptadores montados na figura 21 e o CAD do modo explosão dos adaptadores na figura 22.

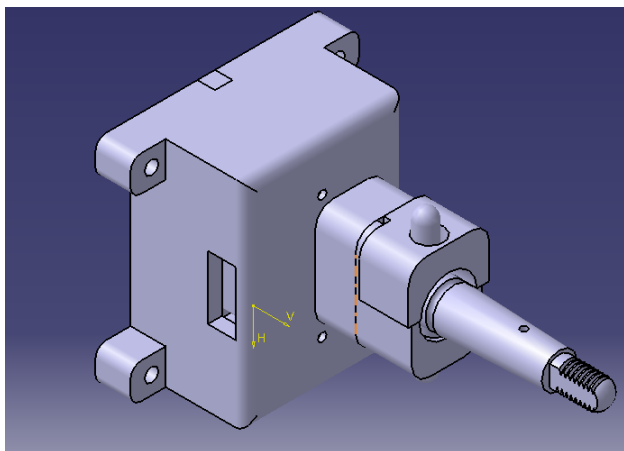


Figura 21. CAD dos adaptadores montados na torneira da bureta

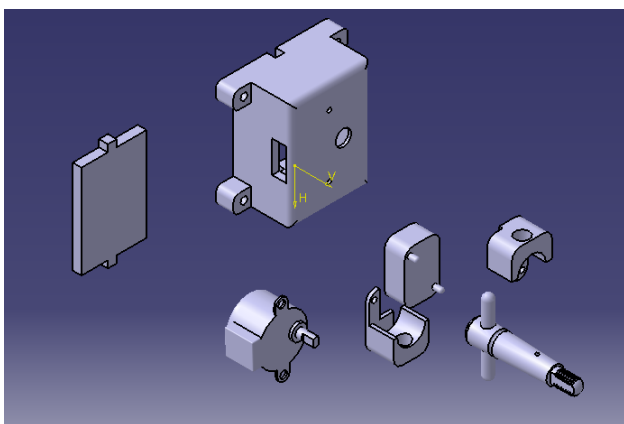


Figura 22. CAD do modo explosão dos adaptadores e a torneira da bureta

A estrutura foi essencial também para padronizarmos o posicionamento do LDR em referência ao LED branco e ao erlenmeyer. Para isso, colocamos uma base improvisada de cola quente na chapa de plástico usada como suporte do erlenmeyer e fixamos o led e o LDR com cola quente em um arco de ferro que se fixa no suporte da bureta. Desta maneira, o posicionamento do erlenmeyer, do LED e do LDR foi padronizado, de tal forma que reduziu drasticamente a variação entre tensões testadas no resistor cuja tensão é capturada pelo MSP430 e permitiu que o sistema fosse calibrado.

E. Cor do ponto de Virada

A fenolftaleína é um corante utilizado para verificar se a quantidade de íons básicos é igual à quantidade de íons ácidos. Uma vez detectada esta igualdade, a fenolftaleína passa de incolor para cor-de-rosa. A mudança de cor faz com que a intensidade luminosa caia.

Para que esse processo fosse simulado, foi utilizado um corante alimentício chamado anilina. Esse processo foi simulado para que os insumos do laboratório não fossem gastos na calibração dos equipamentos. Para o ponto de virada, foi

necessário calibrar empiricamente o valor do critério de 10 bits do comparador do conversor ADC10, por conta da sua sensibilidade à luz infravermelha que é emitida pelo corpo humano e por vários objetos encontrados no ambiente de testes. Desta forma, a melhor metodologia encontrada pelo grupo para calibrar o LDR se encontrou em acionar o sistema com um erlenmeyer com água e observar a tensão do resistor que estava em análise pela MSP430. A partir disso, uma solução de água com alina foi gradativamente gotejada na água do erlenmeyer até que o sistema parasse. Uma vez que isto aconteceu, encontramos a tensão equivalente ao número de 10 bits que estava sob teste e então foi possível calcular um valor aproximado para interromper o sistema para uma coloração bem clara como a da fenolftaleína. Ademais, para que sempre pudessemos obter os mesmos resultados, adotamos o volume no erlenmeyer fixo para todos os testes como 150ml de água.

Pela figura 15 podemos observar o resultado da mistura. Essa cor é suficiente para que a intensidade luminosa caia e altere a resistência no LDR.

Este método, conseguiu encontrar um valor de 10 bits que foi capaz de parar o gotejamento de fenolftaleína diluída em água ainda com uma coloração bem clara, tal que experimentalmente é muito difícil adquirir em função da necessidade de muita destreza e familiaridade com as vidrarias.

F. Uso do motor de Passo

O motor de passo escolhido para o projeto foi o motor 28BYJ-48 – 5V. De acordo com o datasheet do motor de passo o seu torque, a vazio, é de $34.3mN \cdot m$. Sabendo disso, na instalação do mesmo ao mecanismo de abertura da bureta, o motor não conseguiu abrir a bureta, sem que a mesma não vazasse.

Para que o motor pudesse abrir a bureta, a mesma foi colocada em uma condição de quase abertura, em equilíbrio instável. A mesma ficou folgada ao ponto de gotejar na torneira. A posição do motor foi colocada a um ponto onde a torneira esteja na eminência da abertura e a quantidade de passos para que a mesma fosse aberta foi colocada em 200.

O motor então apresentou uma folga, a qual colocava o motor em uma posição diferente a cada ciclo de abertura e fechamento da válvula.

G. Possível Implementação

Para que o projeto seja implementado no laboratório de química da FGA, é necessário alterar alguns parâmetros e componentes do projeto.

1) *Abertura da Bureta:* Para que seja possível a abertura da válvula sem que a mesma fique na eminência de vazamento, será necessário a troca do motor de passo. Um motor que pode ser utilizado é o NEMA17, muito usado em impressoras 3D e CNC's. Isto se deve ao fator do motor de passos utilizado no nosso projeto não ter alcançado o torque necessário para abrir a válvula quando ela está corretamente vedada pela porca. Para que o sistema funcionasse foi preciso afrouçar um pouco a porca, fato o qual ocasionou em pequenos vazamentos de fluido.

2) *Deteção do Ponto de Virada:* Vimos acima que o LDR é um componente muito sensível que sofre alteração da resistência com a iluminação local, quantidade de pessoas no ambiente, temperatura, vortex criado com o misturador magnético, etc. Para isso, devemos então pensar em uma estrutura que mantém o LDR imune às condições do ambiente ou então substituir o LDR por um sensor de PH. Uma sugestão é criar uma "capinha" para o erlenmeyer que contenha um LDR e um LED branco na parte interior e que isole o sistema da luz exterior. Existe também outra maneira que é utilizar de outros sensores como o de PH para realizar a mesma tarefa, pois a neutralização de duas soluções ocorre em PH neutro.

3) *Controle Automático do Gotejamento:* A instalação do equipamento e sua calibração será feita pelos técnicos do laboratório. Os mesmos não devem estar atentos a posição do duto da torneira da bureta. Para isso, é necessário a instalação de um sensor de gotejamento, muito presente em aplicações biomédicas como bomba de infusão, para que de acordo com a informação coletada pelo sensor, o motor abra a bureta sempre na mesma posição. O motor deve também permanecer desligado quando não estiver em uso para que assim permita rotacionar o seu eixo de forma a calibrar quando necessário.

4) *Interface Usuário-Máquina:* A interface pode ter o display trocado por um que utiliza a comunicação SPI, para diminuir a quantidade de pinos e simplifica a transferência de dados. Também, poderia implementar um isolamento contra água para impedir acidentes danifiquem o equipamento ou causem um curto-circuito.

5) *software:* O software pode ser repensado de forma que o mesmo fique mais fácil para debug. O processo de desenvolvimento do software pode ser feito de maneira mais intuitiva, uma vez que o elaborado para este projeto usa muitas interrupções e deixa o processo de manutenção mais penoso.

6) *alimentação e autonomia:* O projeto também necessita de autonomia de energia e de uma case segura. O produto não ficará o tempo todo conectado a um computador para alimentação, então é necessário pensar em uma alimentação externa. Uma possível solução é anexar ao projeto uma bateria recarregável de 12V. É interessante também pensar em uma case que deixa o módulo de controle do sistema imune a respingos, uma vez que o projeto se encontrará em um ambiente com líquidos ao seu redor.

H. Tabela dos Preços

A tabela IV nos apresenta o preço e quantidade de cada item do projeto, bem como preço final.

Tabela IV. TABELA DOS INDICADORES DE TITULAÇÃO

Qtd	Componente	Preço - R\$
1	MSP430G2553	80,00
1	Motor de Passo 28BYJ-48	10,00
2	Driver ULN2003	2,90
1	Cooler 12V genérico	5,00
1	jogo de ímã neodímio	21,00
1	jogo de jumpers	12,90
1	Display LCD 16x2	15,90
-	Total	R\$ 150,60

IV. CONCLUSÕES

Dado que o objetivo do projeto é desenvolver um produto que solucione um problema do laboratório de Química na UnB Gama, é possível notar que o mesmo se encontra bem embasado e explica de maneira clara os objetivos e requisitos.

O produto deste projeto realizou bem os seus objetivos. A estrutura projetada para operar a válvula disponível no laboratório ofereceu boa aderência e permitiu rotacionar com facilidade. O LDR cumpriu o seu objetivo uma vez que foi sensível à mudança da intensidade da luz refletida pela solução do erlenmeyer. O display LCD conseguiu atualizar de forma satisfatória e acompanhou os comandos do usuário. O motor teve dificuldade para rotacionar a válvula com o adaptador quando a rosca que veda o vazamento do fluido da bureta está bem firme, assim para o funcionamento foi necessário afrouxar um pouco a rosca. A temporização e a frequência implementada pelo Timer A da MSP430 conseguiu oferecer exatidão para o experimento de forma que nenhuma gota a mais cai da bureta após a detecção ocorre e isto infere grande precisão ao sistema. A intensidade da coloração da solução de fenolftaleína obtida na interrupção do sistema se apresentou bem clara e desta forma poderia facilmente detectar o momento de viragem da neutralização ácido-base.

O projeto deste sistema de gotejamento sensível à mudança de cor foi concluído com sucesso e despertou interesse por parte dos técnicos e dos professores responsáveis pelo laboratório de química da Faculdade. O encargo se deve ao fato de que este sistema possui grande funcionalidade e oferece boa precisão para experimentos de química. Além disso, o custo para implementar um sistema como este é significativamente menor em comparação aos aparelhos disponíveis no mercado.

REFERÊNCIAS

- [1] TCS3200 Datasheet - Texas Advanced Optoelectronic Solutions - <https://www.mouser.com/catalog/specsheets/TCS3200-E11.pdf>
- [2] ITM-1602BSTL - INTECH LCD GROUP - Display LCD 16x2 - http://www.intech-lcd.com/image/Character_LCM/1602b-c.pdf
- [3] COLOR DETECTION DEVICE using MSP430 launch pad - <https://www.youtube.com/watch?v=zj8cD8tLFYo>
- [4] LCD 16x2 with MSP430 TUTORIAL - <https://www.youtube.com/watch?v=P3i4YHqJeMs>
- [5] Essential Magnetic Stirrer Terms - <https://www.catscientific.com/magnetic-stirrer-glossary-of-terms/>
- [6] Magnetic Stirrers - http://www.prosense.net/files/Magnetic_Stirrers.pdf
- [7] Titulação - Brasil Escola - <https://brasilecola.uol.com.br/quimica/titulacao.htm>
- [8] OLIVEIRA, Leonardo Gabriel de ; FERREIRA, Marcelo Sutil , SOUZA. Carlos Marques (orientador). **Misturador magnético digital de fluidos**. Revista Tecnológica da FATEC-PR, v.1, n.6, p. 204 - 226, jan./dez., 2015.
- [9] UnB Gama - Graduação - <https://fga.unb.br/unb-gama/graduacao>
- [10] Química Geral Teórica - <https://matriculaweb.unb.br/graduacao/disciplina.aspx?cod=114626>

APÊNDICE

CÓDIGO DO PRODUTO FINAL

```
#include <msp430g2553.h>
#include <legacymsp430.h>
```

```

#define IN_AD BIT1
#define IN_AD_CH INCH_1
#define COIL1 BIT0
#define COIL2 BIT7
#define COIL3 BIT2
#define BTN BIT3
#define COIL4 BIT4
#define COOLER BIT6
#define COILS (COIL1 + COIL2 + COIL3 +
    ↪ COIL4)

#define COLORACAO 500
#define Speed_1 1200
#define Speed_2 5000
#define Speed_3 50000
#define Speed Speed_1
#define Dcycle 6
#define passo_max 200

volatile unsigned int i = 0, passos = 0,
    ↪ start = 0;
int Direcao = 0, flag = 0, flag1 = 1,
    ↪ flag2 = 1, lcd = 0;

void main (void)
{ WDTCTL = WDTPW + WDTHOLD;

    BCSCTL1 = CALBC1_1MHZ;
    DCOCTL = CALDCO_1MHZ;

    P1DIR &= ~BTN; // Habilita resistor de
        ↪ pull-up
    P1REN |= BTN; // Habilita resistor de
        ↪ pull-up
    P1OUT |= BTN; // Define estado inicial
        ↪ do port1

    P1DIR |= COILS;
    P1OUT &= ~COILS;

//-----
    P1DIR |= COOLER;
    P1SEL |= COOLER;
    P1SEL2 &= ~(COOLER);
    P1OUT &= ~(COOLER);
//-----

    P1IES |= BTN; // Definicao da borda
        ↪ subida/descida
    P1IE |= BTN; // Habilitando a
        ↪ interrupcao p/ P1.3
    P1IFG = 0x00; // Registrador referente
        ↪ a flag

    TA0CTL = TACLR;
    TA0CTL = MC_0;

    TA0CCR0 = Speed-1;

//-----
// Configuracao Cooler
    TA0CCR1 = Speed/(100/Dcycle)-1;
    TA0CCTL0 &= ~CAP;
    TA0CCTL1 = OUTMOD_7;
//-----

//-----
// Configuracao LDR conversor AD

    ADC10CTL0 = SREF_0 + ADC10SHT_0 +
        ↪ ADC10ON + ADC10IE;
    ADC10AE0 = IN_AD;
    // Com SHS_0, uma conversao sera
        ↪ requisitada
    // sempre que o bit ADC10SC for setado
        ↪ em ADC10CTL0
    ADC10CTL1 = IN_AD_CH + SHS_1 +
        ↪ ADC10DIV_0 + ADC10SSEL_3 +
        ↪ CONSEQ_2;
    ADC10CTL0 |= ENC;
//-----

// Configuracao do LCD-----

    InitializeLcm();
    ClearLcmScreen();

    ClearLcmScreen();
    delay_ms(100);
    LcmSetCursorPosition(0,0);
    PrintStr("PRESSIONE O BTN");
    LcmSetCursorPosition(1,0);
    PrintStr(" PARA INICIAR");
//-----

    _BIS_SR(GIE + LPM0_bits);
}

interrupt(TIMERO0_A1_VECTOR) TA0_ISR(void)
{
    //64*64+32 contagem para uma volta
        ↪ completa

    if ((passos <= passo_max)&&(start)){

        switch(i){
            case(0):
                P1OUT = (P1OUT|COIL1)&(~(COIL2
                    ↪ +COIL3+COIL4));
                if (Direcao) i++;
                else i=7;
                break;
            case(1):

```

```

        P1OUT = (P1OUT | (COIL1+COIL2))
        ↪ &(~(COIL3+COIL4));
        if (Direcao) i++;
        else i--;
        break;
    case(2):
        P1OUT = (P1OUT | COIL2) & (~ (COIL1
        ↪ +COIL3+COIL4));
        if (Direcao) i++;
        else i--;
        break;
    case(3):
        P1OUT = (P1OUT | (COIL2+COIL3))
        ↪ &(~(COIL1+COIL4));
        if (Direcao) i++;
        else i--;
        break;
    case(4):
        P1OUT = (P1OUT | COIL3) & (~ (COIL1
        ↪ +COIL2+COIL4));
        if (Direcao) i++;
        else i--;
        break;
    case(5):
        P1OUT = (P1OUT | (COIL3+COIL4))
        ↪ &(~(COIL1+COIL2));
        if (Direcao) i++;
        else i--;
        break;
    case(6):
        P1OUT = (P1OUT | COIL4) & (~ (COIL1
        ↪ +COIL2+COIL3));
        if (Direcao) i++;
        else i--;
        break;
    case(7):
        P1OUT = (P1OUT | (COIL1+COIL4))
        ↪ &(~(COIL2+COIL3));
        if (Direcao) i=0;
        else i--;
        break;
    }

passos++;
if ((passos>passo_max) && (flag))
    TA0CTL = MC_0;
}

TA0CTL &= ~TAIFG;

if ((start) && (flag1))
{
    ClearLcmScreen();
    //delay_ms(100);
    LcmSetCursorPosition(0,0);
    PrintStr(" AGUARDANDO");
    LcmSetCursorPosition(1,0);
    PrintStr(" DETECCAO");

    flag1 = 0;
}

if ((lcd) && (flag2))
{
    ClearLcmScreen();
    // delay_ms(100);
    LcmSetCursorPosition(0,0);
    PrintStr("PROCESSO");
    LcmSetCursorPosition(1,0);
    PrintStr("FINALIZADO");
    flag2=0;
}

interrupt(ADC10_VECTOR) ADC10_ISR(void){
    //Luz fraca => trocou de cor => tensao
    ↪ baixa => trocar direcao e zerar
    ↪ passos
    if(ADC10MEM < COLORACAO){
        if(!flag){
            Direcao ^= 1; // Troca a direcao
            passos = 0;
            lcd = 1;
            flag = 1;
        }
    }
    ADC10CTL0 &= ~ADC10IFG;
}

interrupt(PORT1_VECTOR) Interrupcao_P1(
    ↪ void)
{
    start = 1;
    flag1 = flag2 = 1;
    TA0CTL = TASSEL_2 + MC_1 + ID_0 + TAIE;
    P1IFG = 0x00;
}

```