

Universidade Federal de Santa Catarina
Departamento de Engenharia Elétrica e Eletrônica
EEL7837 - Projeto Nível I em Eletrônica II

Detector de Gasolina Adulterada

Aluno Vinícius D. Alves 14100702

Professor Jefferson Luiz Brum Marques

21 de Setembro de 2020

Conteúdo

1	Introdução	1
2	Descrição do Projeto	2
3	Fundamentação Teórica	3
3.1	Fundamentos da determinação da composição de substâncias por propriedades elétricas	3
3.2	Impedância de Fluidos	4
3.3	Conversão Analógico-Digital	5
4	Projeto do Dispositivo	7
4.1	Excitador	8
4.2	Medidor	9
4.2.1	Divisor de Tensão Simples	9
4.2.1.1	Dimensionamento do Resistor de Referência	11
4.2.2	Redução do Impacto do Ruído de Quantização por meio de Elementos Ativos	13
4.2.2.1	Dimensionamento do Elemento Ativo	13
4.2.3	Bufferização do Sinal de entrada	14
4.2.4	Tensão de Offset	15
4.2.5	Fonte Simétrica	16
4.2.6	Esquemático final do estágio de medição	17
4.3	Protótipo Final	17
4.4	Processamento dos Dados	18
5	Resultados e Trabalhos Futuros	21
6	Apêndice	23
6.1	Código do Controlador	23
6.2	Script para determinação do Desvio Padrão	26
	Referências	27

1 Introdução

Estima-se que só em São Paulo 7% dos postos adulteram a gasolina que vendem [4]. Mesmo com uma fiscalização mais incisiva, os fraudadores ainda conseguem praticar o ato graças a adoção de tecnologias mais sofisticadas, como os chips que permitem de maneira remota a seleção entre a gasolina adulterada e a formulada [9]. Os danos provocados pela gasolina adulterada variam desde a perda de performance e dificuldade em partir o motor do carro até a corrosão e entupimento de componentes do sistema de injeção que podem causar grandes prejuízos para o proprietário do veículo [4]. Dado esse cenário, e a onda de combate a corrupção que tomou o país nos últimos anos, creio que munir o consumidor com uma tecnologia que o permita auditar a gasolina que compra de forma ágil e econômica seja a maneira mais eficiente, uma vez que não depende do Estado e de seus inumeráveis órgãos de fiscalização, de combater essa forma de corrupção praticada por postos de gasolina.

Dentre desse contexto, esse projeto tem como propósito o desenvolvimento do protótipo de um dispositivo capaz de efetuar a verificação do conteúdo de etanol de amostras de gasolina.

2 Descrição do Projeto

Objetiva-se por meio desse projeto a pesquisa, desenvolvimento e implementação do protótipo de um dispositivo portátil e de fácil uso que seja capaz de inferir o teor alcoólico de uma amostra de gasolina e, assim, determinar se essa encontra-se dentro dos requisitos da legislação.

O dispositivo explora a diferença de resistividade da gasolina e do etanol, o que implica em diferentes resistividades para soluções com diferentes proporções de etanol e gasolina.

Para efetuar a medição da resistência da solução, o dispositivo é constituído por uma sonda de geometria padrão, o que torna as resistências medidas comparáveis, eliminando-se a necessidade de calcular-se a resistividade a partir da resistência mensurada. Através da sonda citada, o fluído é excitado com uma tensão alternada gerada por módulo excitador e a diferença de tensão sobre o fluído é medida pelo módulo medidor. Esse, por sua vez, coleta amostras que são filtradas, processadas e alimentam uma função interpolante que descreve a relação entre a concentração volumétrica de etanol e a resistência medida. O resultado do cálculo da função é a concentração volumétrica de etanol da solução sob teste, que, quando comparado com o especificado na legislação, determina se a solução está ou não adulterada.

Para comprovar o funcionamento do dispositivo irá comparar-se o resultado de suas medidas com o procedimento clássico de extração da fase aquosa do sistema heterogêneo água-etanol-gasolina.

3 Fundamentação Teórica

3.1 Fundamentos da determinação da composição de substâncias por propriedades elétricas

A determinação da constituição de um material é feita a partir de suas propriedades intensivas [8], tais como densidade, dureza e índice de reflexão. No domínio eletromagnético, materiais podem ser caracterizados por propriedades como resistividade, permitividade e permissividade, isto é, ao medir-se a impedância de um material e calcular-se sua resistividade, permitividade e permissividade características, levando-se em conta sua geometria, é possível distinguir o material em questão de outros que apresentem diferentes características eletromagnéticas. Evidentemente que materiais podem compartilhar características eletromagnéticas e ainda sim serem classificados como materiais diferentes, sendo a diferenciação provocada por características num domínio diverso, tal como o mecânico ou o óptico.

Aplicações deste conceito podem ser encontradas nas mais diversas áreas da ciência, destacam-se dois exemplos: a mensuração da composição corporal através da bioimpedância e a inferência do conteúdo geológico do solo através do método da eletro-resistividade.

A técnica de bioimpedância explora a diferença de condutividade entre tecidos, isto é, tecidos com maior disponibilidade de eletrólito, como o tecido muscular, apresentam menor resistência elétrica enquanto tecidos adiposos, maior resistência. Além disso, também é explorada a diferença entre a característica do caminho intra e intercelular, sendo o primeiro caracterizado por apresentar um comportamento resistência e reatância capacitiva e o segundo, apenas resistência [3].

O método da eletro-resistividade, por sua vez, é um técnica da geofísica que utiliza um arranjo de eletrodos conectados a superfície do solo para produzir, através da mensuração da resposta ao transitório, uma imagem da subsuperfície, utilizada para estudo da composição do solo e investigação de lençóis freáticos [6][5].

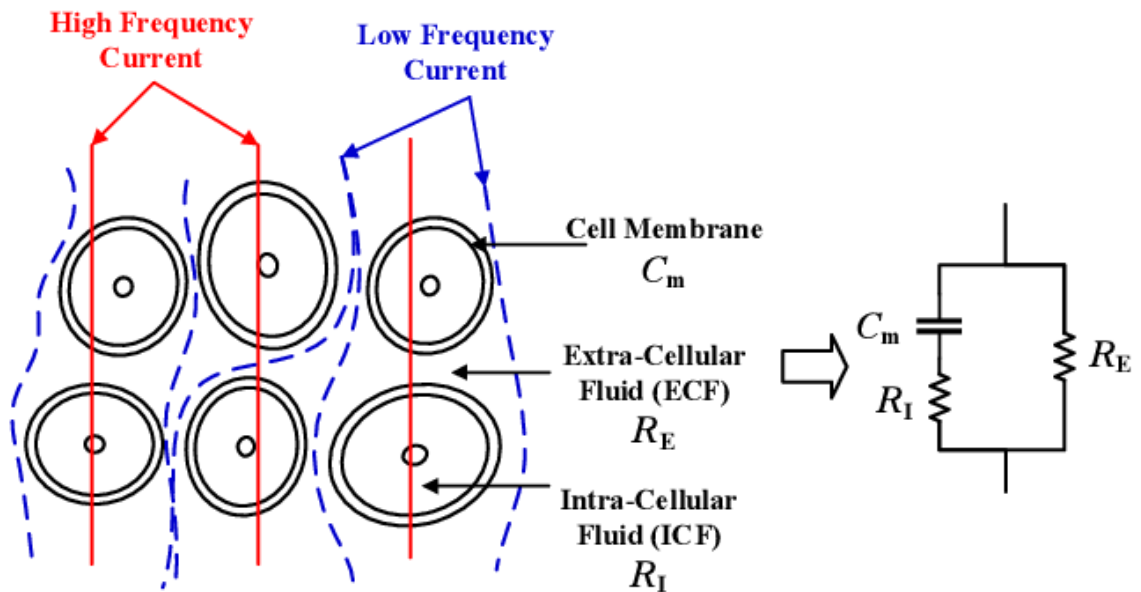


Figura 1: Modelo elétrico de tecidos celulares utilizado como base para a técnica de bioimpedância [7]

3.2 Impedância de Fluidos

Sendo a impedância a relação entre tensão e corrente dada a aplicação de uma tensão alternada em um meio, é possível, embora possa soar não-convencional, a ideia de impedância em um fluido. A impedância em um fluido é avaliada através da inserção de eletrodos que impõem uma tensão alternada no fluido que os circundam. A condução elétrica no fluido, que ocorre apenas em determinadas condições, pode ocasionar diversos efeitos que não são encontrados em sólidos.

Dado que a passagem em fluidos só ocorre mediante a presença de íons, ao se aplicar uma corrente contínua num fluido, atraindo-se os íons para os eletrodos, ocorre o fenômeno da eletrólise uma vez que os íons recebem/cedem elétrons para os eletrodos, incorrendo uma reação química que muda as substâncias ali presentes [12]. Como a mudança da substância sob medida é um efeito que impede a repetibilidade da medida e compromete o futuro uso da substância, a eletrólise é algo a ser evitado na medição da impedância em fluidos, o que implica na existência de uma frequência mínima de medição (dependente da característica elétrica do fluido e da geometria dos eletrodos) para que a medição não provoque eletrólise.

Por outro lado, fenômenos como a formação de uma camada elétrica dupla na interface entre os eletrodos e o eletrólito fazem com que esse apresente uma componente capacitiva. Numa modelagem simples, o fluido apresenta a característica de um circuito RC paralelo no qual a componente resistiva representa a resistência do substrato. Assim, ao desejar-se medir a componente resistiva, implica-se na existência de uma frequência limite para o qual os efeitos resistivos dominem os capacitivos. No artigo 'A simple impedance method for determining ethanol and regular gasoline mixtures mass contents' [11] demonstra a existência de tais limites e os calcula a partir das características elétricas do fluido em questão para um transdutor com geometria similar a um cabo coaxial. O resultado encontrado foi o seguinte:

Efeito	Limites
Limiar de eletrólise do etanol	$f \leq 10 \text{ Hz}$
Dominância Resistiva na solução etanol-gasolina	$f < 370 \text{ kHz}$
Dominância Capacitiva na solução etanol-gasolina	$f > 3.7 \text{ MHz}$

Tabela 1: Limites de frequências por efeitos elétricos e no fluido

Nesse trabalho, como foi empregado um transdutor com geometria diferente da usada pelo artigo supracitado, utilizou-se testes empíricos para determinação da frequência de excitação do fluido, que foram posteriormente embasados nos fenômenos descritos acima. A determinação empírica observou que ao aplicar-se uma tensão continua notava-se que a diferença de potencial entre os eletrodos crescia com o tempo, indicando a existência de um componente capacitivo sendo carregado ao longo do período, que pode ser um efeito causado pela eletrólise da solução. Ao testar-se uma excitação com tensão alternada, percebeu-se que o efeito era reduzido e, portanto, aumentou-se a frequência até o ponto no qual o efeito de aumento da tensão desaparecesse completamente. A frequência encontrada empiricamente foi de 312.5Hz, estando essa no intervalo teórico previsto de 10Hz a 370kHz para soluções de etanol e gasolina.

3.3 Conversão Analógico-Digital

A conversão analógico-digital é o processo de conversão de um sinal analógico, caracterizado por ser contínuo no tempo e em amplitude, num sinal digital, discreto no tempo e discreto em amplitude. Em outras palavras, a conversão analógico-digital transforma uma grandeza física num determinado momento em um número digital representando a magnitude dessa grandeza naquele momento do tempo.

A conversão analógico-digital ocorre em duas etapas: a amostragem e a quantização. A amostragem é a captura e congelamento da amplitude do sinal analógico por determinado período de tempo, o período de amostragem (figura 2).

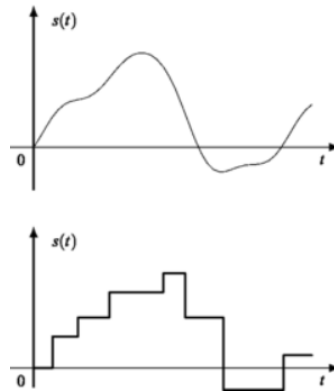


Figura 2: Representação da amostragem como ela ocorre no fisicamente no conversor analógico-digital, isto é, o congelamento periódico de níveis de tensão do sinal de entrada.

Durante esse período de tempo o conversor analógico executa a quantização da amplitude amostrada, a quantização é o processo de converter a amplitude para um número digital correspondente, isto é, associar a amplitude do sinal analógico, que pode assumir infinitos valores dentro de um determinado intervalo, com um valor valor finito específico pertencente à escala do conversor analógico-digital (figura 3).

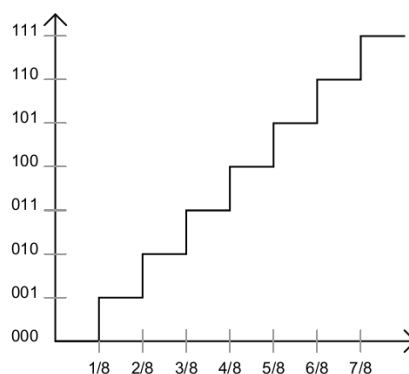


Figura 3: Representação da função executada pelo quantizador do conversor analógico digital, convertendo intervalos contínuos de amplitude num conjunto finito de números digitais.

No momento em que se efetua a associação de amplitudes que podem assumir infinitos valores dentro de um intervalo para um conjunto finito de representações, ocorre

uma perda de informação, pois diferentes valores de amplitude do sinal analógico serão associados ao mesmo ponto da escala digital do conversor analógico-digital. Essa perda de informação pode ser descrita na forma de um erro, isto é, de um intervalo em torno do número obtido a partir da quantização. Esse intervalo representa o conjunto dos valores de amplitude do sinal analógico que podem ser associados indistintamente ao número digital em questão.

O erro de quantização é determinado diretamente pelas especificações do conversor analógico-digital, pois esse depende apenas de dois parâmetros: o intervalo que esse é capaz de mensurar o sinal analógico e a quantidade de pontos disponíveis na escala desse para associar as amplitudes analógicas. No caso do ATmega328P, o conversor analógico-digital opera no intervalo de 0 à 5V e possui resolução de 10 bits, isto é, representa números digitais com até 10 algarismos binários. Isso significa que o conversor apresenta 1024 (2^{10}) pontos em sua escala e, portanto, o intervalo de amplitudes que é mapeado para um ponto específico é de aproximadamente 0.005 V, ou seja, toda tensão quantizada apresenta um erro de $\pm 0.005 V$.

O erro de quantização também pode ser interpretado como um ruído que é adicionado ao sinal durante o processo da quantização. Através dessa interpretação pode-se estimar o impacto da quantização no sinal resultante através do cálculo da relação sinal-ruído entre o sinal e o ruído de quantização. A relação sinal-ruído é diretamente proporcional ao quadrado do quociente da amplitude do sinal e da amplitude do erro, o que pode ser compreendido intuitivamente, uma vez que quanto menor o sinal sendo quantizado menos pontos na escala do conversor analógico-digital serão utilizados para representá-lo. Tomando-se como exemplo o conversor analógico-digital do ATmega328P, imagine um sinal senoidal com média e amplitude iguais à 0.005 V, a sua quantização resultaria na representação da amplitude do sinal por apenas dois números digitais distintos (0 e 1), o que é uma perda imensa de informação, visto que qualquer sinal não senoidal que apresente a mesma amplitude também seria reduzido a mesma sequência de números digitais que o sinal senoidal [10][1][2].

4 Projeto do Dispositivo

Em termos de arquitetura, o dispositivo é constituído por três principais componentes: o excitador, o medidor e um controlador. O bloco excitador é responsável por estimular o fluido com uma tensão alternada, enquanto o medidor efetua a medida da resposta resistiva do fluido (ignora-se a componente capacitiva uma vez que a frequência de excitação é escolhida de forma que a componente resistiva seja dominante). O controlador é responsável por controlar a excitação e efetuar a conversão analógico-digital da medição de forma sincronizada.

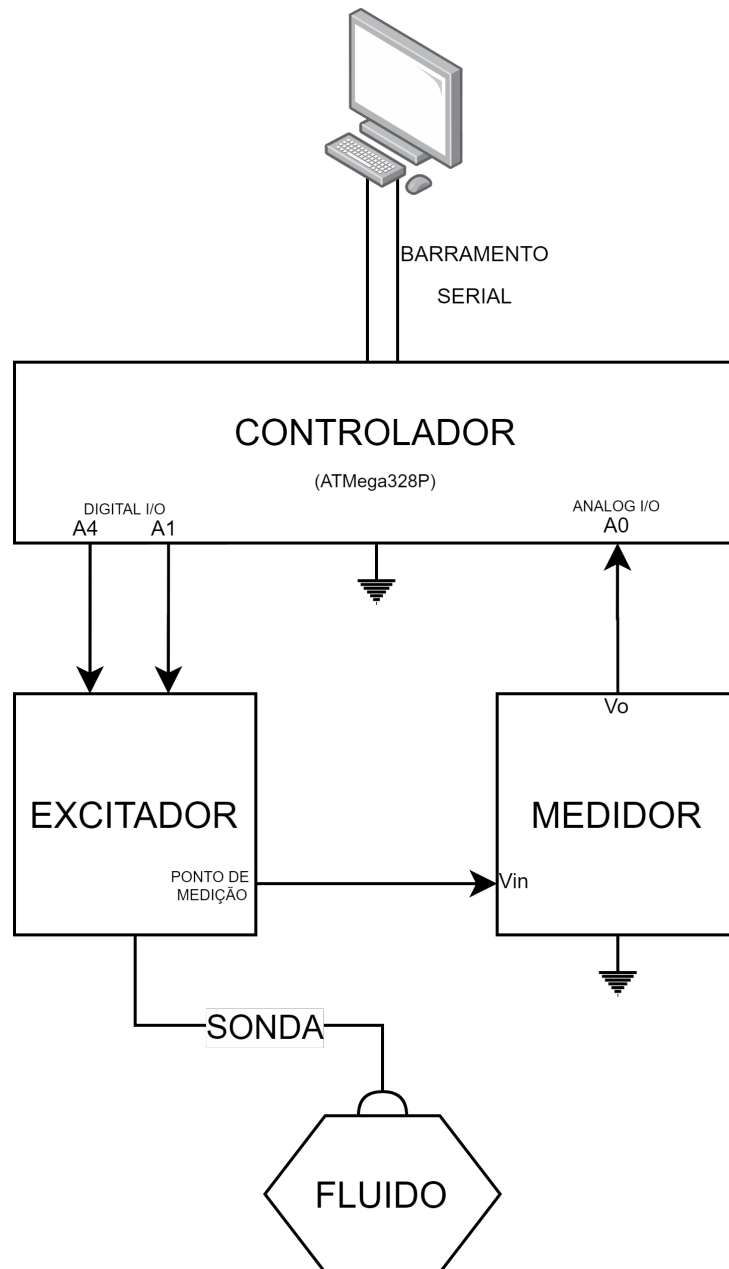


Figura 4: Arquitetura do Detector

4.1 Excitador

Idealmente o excitador deve estimular o circuito com uma tensão alternada sinusoidal de forma a evitar distorção do sinal ao atravessar o circuito RC paralelo formado pelo fluido. No entanto, como a frequência de excitação é selecionada de forma a tornar a presença do capacitor desprezível, isto é, apenas as harmônicas de alta ordem de um sinal não sinusoidal serão afetadas pela presença da reatância capacitiva.

Nesse contexto, a escolha de uma onda quadrada como excitadora é ideal por ser facilmente gerada a partir de um microcontrolador e por apresentar baixa energia nas harmônicas de alta frequência, tornando a distorção consequente também desprezível. Para gerar-se uma onda quadrada, basta ligar e desligar um pino digital de um microcontrolador em intervalos regulares de tempo, no entanto, para que essa onda seja alternada e não apenas pulsante nos eletrodos, é necessário que a referência alterne entre os eletrodos a cada ciclo. Para atingir esse efeito a excitação é feita através de dois pinos digitais, dessa forma, o eletrodo que na primeira parte do ciclo é ligado a alimentação (A4) por meio do ligamento do pino digital, na segunda parte do ciclo é ligado ao terra (GND) por meio do desligamento do pino digital. O resultado é uma onda quadrada alternada de amplitude igual à V_{cc} do ponto de vista de R_s , isto é, sendo A1 a referência (A1_GND), como mostra o diagrama abaixo.

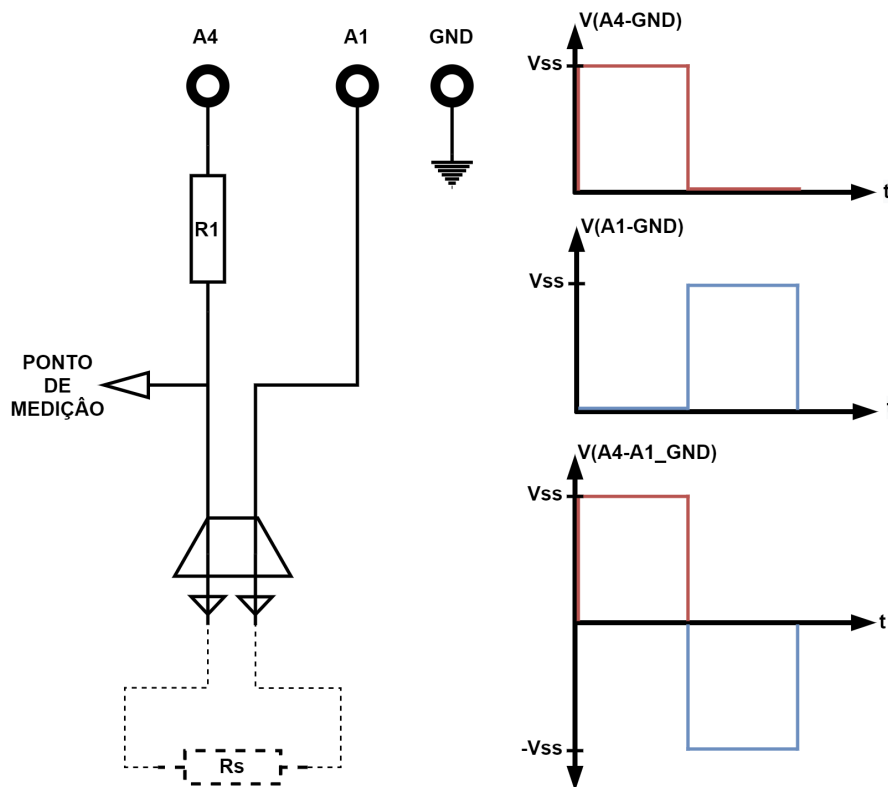


Figura 5: Circuito do Excitador e Excitação no domínio do tempo.

Nota: V_{ss} na imagem é na verdade V_{cc}

Por fim, ao verificar-se que resistência da solução de gasolina e etanol é da ordem de centenas de milhares de Ohms, não se faz necessário a *bufferização* dos pinos A1 e A4, para que esses não sejam sobrecarregados pela corrente drenada pelo fluido. Portanto, o circuito final do excitador se resume ao mostrado no esquemático do diagrama 5.

4.2 Medidor

Para medir-se a resistência do fluido é necessário conhecer-se a diferença de potencial que esse está submetido e a corrente que o atravessa num determinado instante de tempo. No entanto, como conversores analógico-digitais mensuram apenas tensões, não é possível efetuar uma medida direta da corrente. Para contornar essa limitação é necessário o emprego de um divisor resistivo composto por uma resistência conhecida (R_1) e a resistência que se deseja medir (o próprio fluido, denotado aqui por R_s). O divisor resistivo nos permite inferir a resistência desconhecida através da mensuração da tensão sobre o resistor conhecido (facilmente feito com um conversor analógico-digital), como é demonstrado abaixo:

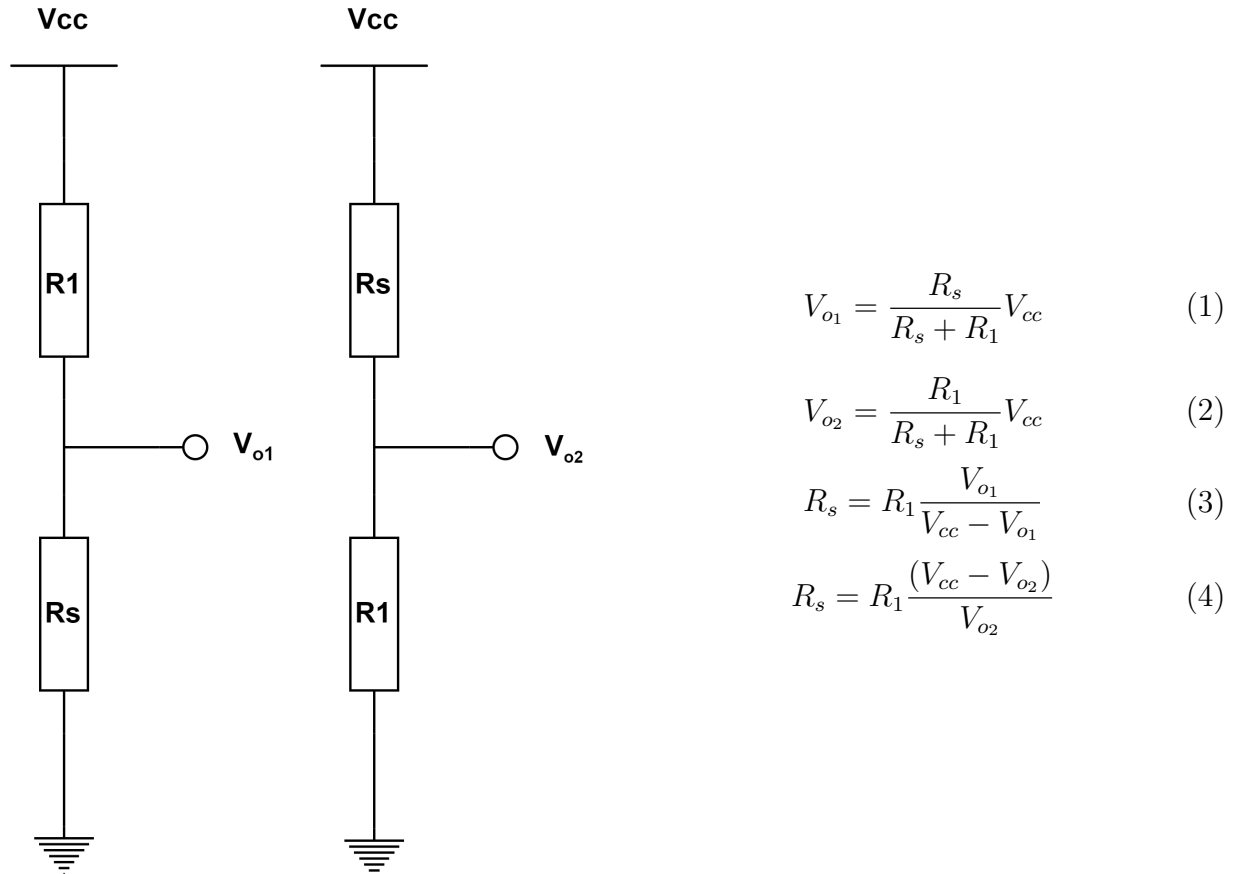


Figura 6: Divisores resistivos formados na primeira (V_{o1}) e segunda (V_{o2}) parte do ciclo de excitação

Sendo o divisor resistivo o coração do sistema de medição, nas seções abaixo serão mostradas duas topologias baseadas no divisor resistivo que foram estudadas.

4.2.1 Divisor de Tensão Simples

O divisor de tensão puro pode ser utilizado diretamente para fazer-se a medição da resistência no fluido. Por ser extremamente simples, foi a primeira abordagem experimental.

O único parâmetro de projeto é o valor da resistência de referência (R_1). Ao analisar-se as equações (1) (2), percebe-se que a escolha de R_1 influencia o intervalo de valores de queda de tensão que R_s poderá causar, isto é, se $R_1 \gg R_s$, a queda de tensão saturará

para próximo de V_{cc} , enquanto que, se $R_1 \ll R_s$, essa, saturará para o terra. Ou seja, durante a conversão analógico-digital, os valores de R_1 muito próximos de V_{cc} ou do terra seriam quantizados como valores iguais, incorrendo-se na perda total da informação contida no sinal.

Se R_s fosse um valor constante, $R_1 = R_s$, seria a escolha ideal, no entanto, como a razão entre álcool e gasolina na mistura é variável e, portanto, R_s é variável, R_1 deve ser escolhido de tal forma que haja um compromisso entre não ser um valor muito abaixo do limite superior do intervalo de valores admitidos para R_s , nem um valor muito acima do limite inferior desse intervalo.

Dada a existência desse trade-off, busca-se encontrar um valor ótimo para R_1 de forma a minimizar o impacto do erro de quantização na conversão analógico-digital, isto é, maximizar a relação sinal-ruído entre o sinal e o ruído gerado a partir do erro de quantização, dado que o erro do quantizador é fixo.

Portanto, sendo V_o e E_q a amplitude do sinal e do erro de quantização, temos que a SNR do sinal em relação é proporcional a:

$$SNR \sim \left(\frac{V_o}{E_q} \right)^2 \quad (5)$$

Como E_q é constante dado um conversor analógico-digital pré-determinado (e desconsiderando-se a alteração da tensão de referência desse conversor (AREF no caso do ATmega328P), temos que a maximização da SNR é proporcional a:

$$\begin{aligned} \max SNR &\sim \max V_o^2 \sim \max V_o \\ \max SNR &\sim \max (V_{o_{max}} - V_{o_{min}}) \sim \max \Delta V_o \end{aligned} \quad (6)$$

Portanto, dado que:

$$R_{s1} \leq R_s \leq R_{s2} \quad (7)$$

Temos que (considerando o circuito da figura 6):

$$\Delta V_o(R_1) = \frac{V_{cc}R_{s2}}{R_1 + R_{s2}} - \frac{V_{cc}R_{s1}}{R_1 + R_{s1}} \quad (8)$$

Como R_s é externo ao circuito e V_{cc} é determinado pela tensão de alimentação do microcontrolador, temos que ΔV_o é passível de ser controlado apenas por R_1 , portanto, a maximização da SNR deverá ser feita com relação à R_1 :

$$\begin{aligned} \max_{R_1} SNR &\sim \max_{R_1} \Delta V_o(R_1) \\ \max_{R_1} \Delta V_o(R_1) &\rightarrow \frac{\partial \Delta V_o(R_1)}{\partial R_1} = 0 \end{aligned} \quad (9)$$

Desenvolvendo-se a expressão (9), obtem-se que a resistência de referência que maximiza a SNR é dada por:

$$R_1 = \sqrt{R_{s1}R_{s2}} \quad (10)$$

4.2.1.1 Dimensionamento do Resistor de Referência

Para dimensionar R_1 , portanto, é necessário a determinação dos valores limites de R_s , isto é, da solução de etanol e gasolina no intervalo de interesse. Para tal, foram confeccionadas amostras (figura 7) com diferentes concentrações de etanol no intervalo entre 27 a 32.7% de concentração de etanol. A concentração de etanol das amostras foi inicialmente verificada através do método de separação da fase aquosa, no entanto, notou-se que o erro de medida da proveta utilizada não era suficientemente baixo para que a verificação fosse feita com sucesso. Para contornar essa limitação, utilizou-se uma balança com precisão de 100 miligramas para determinar-se as quantidades de gasolina e etanol que utilizadas na confecção de cada amostra, dessa forma foi possível confeccionar-se amostras com precisão de pelo menos 140 microlitros.



Figura 7: Amostras: soluções com diferentes concentrações de etanol na gasolina



Figura 8: Mensuração da concentração de etanol pelo método da separação da fase aquosa



Figura 9: Balança de precisão utilizada para reduzir o erro da confecção das amostras de 1000 para 140 microlitros

A partir das amostras foram mensuradas as resistências que definem o intervalo para escolha do valor ótimo de R_1 .

Concentração Volumétrica de Etanol	Resistência média medida com sonda padrão
27 %	359.82 $k\Omega$
28.6 %	260.70 $k\Omega$
30.0 %	218.56 $k\Omega$
31.7 %	174.72 $k\Omega$
32.7 %	155.37 $k\Omega$

Tabela 2: Diferentes resistências medidas a partir das amostras

Aplicando-se a equação (10) considerando os limites mensurados ($R_{s_1} = 155.37 k\Omega$ e $R_{s_2} = 359.82 k\Omega$), temos que o valor ótimo de R_1 para nossa aplicação é 236.44 $k\Omega$. Dado os resistores disponíveis, optou-se por uma combinação de resistores resultando numa resistência equivalente de 200 $k\Omega$, as custas de uma redução (desprezível) de 0.01V na amplitude máxima de V_o .

4.2.2 Redução do Impacto do Ruído de Quantização por meio de Elementos Ativos

Mesmo escolhendo-se R_1 de forma ótima percebe-se que a amplitude do sinal V_o não excursiona todo o intervalo de tensões permitido pelo conversor analógico digital, que vai de 0V à V_{cc} . Para aproveitar completamente esse intervalo de tensões, pode-se empregar um elemento ativo de forma a amplificar o sinal até que esse excursions de 0V à V_{ss} . Porém, percebe-se também que uma mera amplificação não é suficiente para que o sinal excursions por todo o intervalo, visto que o valor mínimo de V_o é diferente de zero. Para contornar essa limitação é necessário que o elemento ativo, além de amplificar, também insira um offset negativo no sinal. Dessa forma, é necessário que o elemento ativo execute a seguinte função sobre o sinal:

$$V_o' = AV_{in} - V_{offset} \quad (11)$$

Sendo:

$$A = \frac{V_{cc}}{V_{in_{max}} - V_{in_{min}}} \quad (12)$$
$$V_{offset} = AV_{in_{max}} - V_{cc}$$

4.2.2.1 Dimensionamento do Elemento Ativo

Optou-se pela utilização de um amplificador operacional TL084 na topologia de um subtrator (figura 10) para aplicação simultânea da amplificação e do offset no sinal de saída do divisor de tensão.

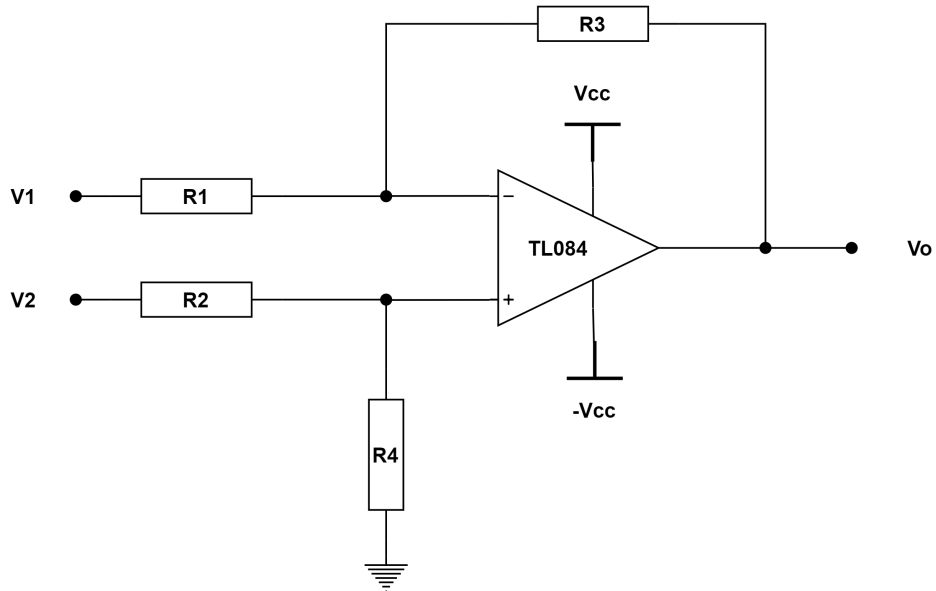


Figura 10: Topologia subtratora utilizada para aplicar um offset e amplificação no sinal de entrada

Como mostrado na equação (13), vemos que a relação entre o sinal de entrada e saída consiste na aplicação de um fator multiplicativo aplicado à R_2 e um offset constituído por V_1 .

$$V_o = V_2 \left(\frac{R_4}{R_2 + R_4} \right) \left(\frac{R_1 + R_3}{R_1} \right) - V_1 \left(\frac{R_3}{R_1} \right) \quad (13)$$

Dado o dimensionamento feito anteriormente para o resistor de referência, calcula-se, através das equações (1) e (2), que os limites de tensão para mensuração de soluções de gasolina com concentração de 27 a 32.7% de etanol, adicionados de uma margem de segurança de 0.2V para evitar saturação do conversor analógico digital, são 1,5 e 3,4V. Uma vez conhecida a tensão mínima e máxima de entrada temos que a amplificação e offset necessários para obtenção da quantização ótimas de acordo com as equações (12) são 2,63 e -3,95, respectivamente.

Para obtenção dos fatores de amplificação e offset calculados anteriormente, temos à disposição R_1, R_2, R_3, R_4 e V_1 como parâmetros de projeto que estão relacionados a amplificação e offset do sinal de entrada pelas equações (14) e (15):

$$A = \left(\frac{R_4}{R_2 + R_4} \right) \left(\frac{R_1 + R_3}{R_1} \right) \quad (14)$$

$$V_{offset} = V_1 \left(\frac{R_3}{R_1} \right) \quad (15)$$

Utilizando-se as expressões acima obtém-se o valor ideal dos parâmetros de projeto:

Parâmetro	Ideal	Comercial (Arranjo)
R_1	1 k Ω	1 k Ω
R_2	3.14 k Ω	3.3 k Ω
R_3	2.458 k Ω	2.5 k Ω
R_4	10 k Ω	10 k Ω
V_1	1.61 V	1.61 V

Tabela 3: Valores ideais e aproximações comerciais para os parâmetros do subtrator

4.2.3 Bufferização do Sinal de entrada

Como o ponto de medição (figura 5), isto é, o ponto no qual a entrada do medidor deve ser conectada, é a saída de um divisor resistivo, temos que sua impedância de saída não é nula. Além disso, a entrada do medidor (V2 na figura 13) não possui alta impedância, ou seja, a conexão direta do medidor ao ponto de medição resultaria num carregamento que altera as características de ambos os circuitos. Devido a isso se faz necessário a introdução de um buffer na entrada do circuito de medição.

Para cumprir esse requerimento empregou-se um amplificador operacional configurado como seguidor de tensão, como esquematizado na figura abaixo.

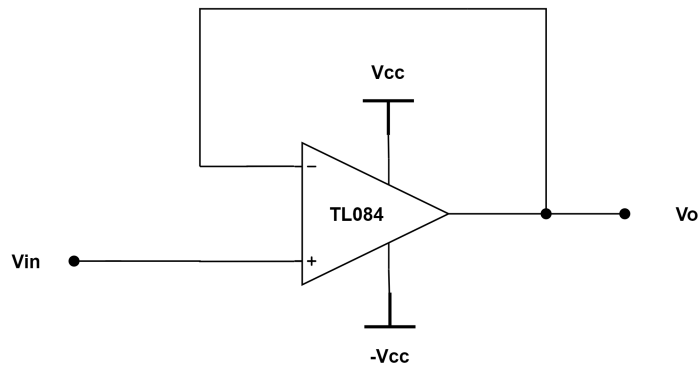


Figura 11: Seguidor de tensão

4.2.4 Tensão de Offset

Percebe-se que o offset aplicado pelo estágio de medição (V_{offset} na equação (15)) é composto não apenas por um quociente de resistências mas pela tensão V_1 . Para geração dessa tensão tensão de referência empregou-se um divisor de tensão composto por resistência de alto valor com saída *bufferizada*, como mostrado na figura 12.

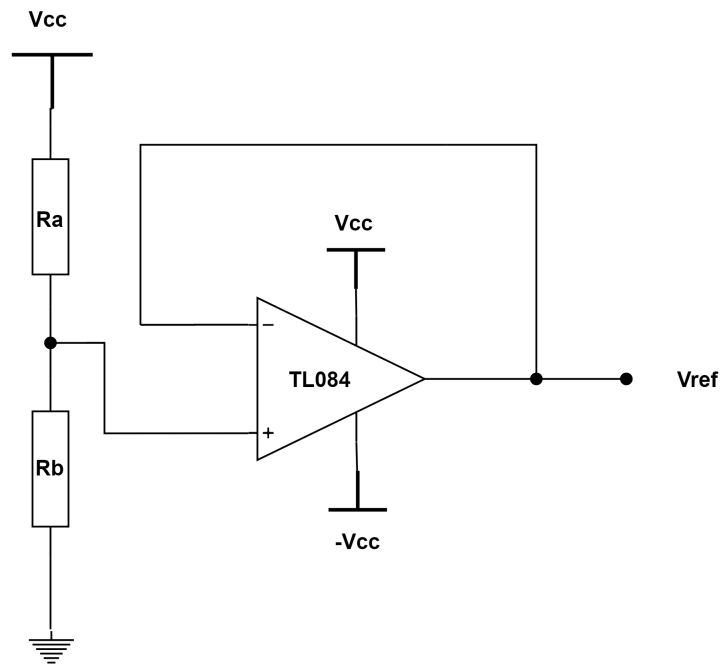


Figura 12: Circuito para geração tensão da tensão V_1 do parâmetro V_{offset}

Na tabela abaixo é mostrado o resultado do cálculo dos parâmetros do circuito:

	Parâmetro	Valor	Comercial (Arranjo)
Parâmetros fixos	V_{cc}	9.95 V	-
	V_{ref}	1.61 V	-
Parâmetros projetados	R_a	$51.7\text{ k}\Omega$	$51.7\text{ k}\Omega$
	R_b	$10\text{ k}\Omega$	$10\text{ k}\Omega$

Tabela 4: Parâmetros do gerador da tensão de referência V_1

O emprego de resistências com alto valor é feito para que o caminho criado entre V_{cc} e o terra pelo divisor de tensão consuma uma baixa corrente, enquanto que a *bufferização* da saída evita o carregamento entre esse divisor de tensão e o estágio de medição.

4.2.5 Fonte Simétrica

Até então foram apresentados diversos blocos que compõe o estágio de medição e em todos eles o amplificador operacional está sendo alimentado por V_{cc} e $-V_{cc}$. Para gerar essas tensões simétricas foi empregado um amplificador operacional num encapsulamento separado (para que esse fosse alimentado por uma fonte não simétrica) na topologia exibida na figura 13.

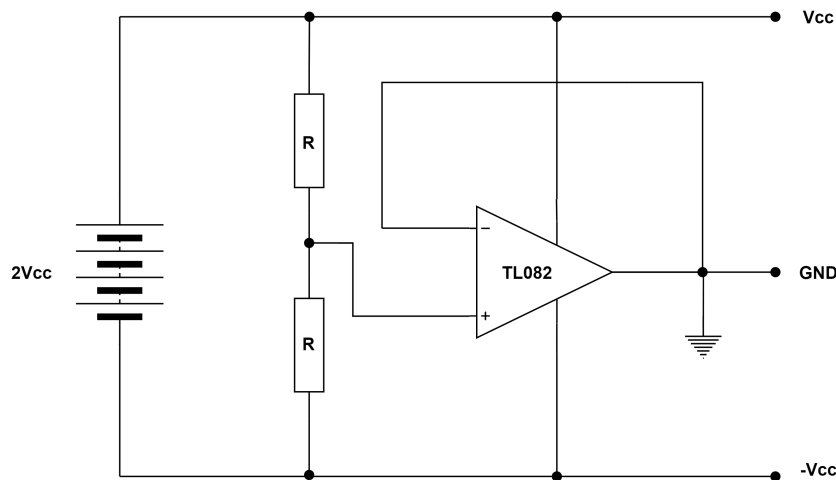


Figura 13: Fonte simétrica utilizada para alimentar os amplificadores operacionais do estágio de medição

O funcionamento da fonte simétrica independe do valor escolhido para o resistor R , mas como ambos resistores R formam um caminho fechado com a fonte, escolheu-se um valor arbitrariamente elevado para minimizar o consumo de energia, no caso, empregou-se resistores de $47\text{ k}\Omega$. Utilizou-se um amplificador operacional TL082 ao invés do TL084 pois o primeiro apresenta 2 amplificadores operacionais por encapsulamento enquanto o segundo, 4, reduzindo-se, assim, a quantidade de amplificadores operacionais desperdiçados.

4.2.6 Esquemático final do estágio de medição

Juntando-se todos os blocos, temos o esquemático final, onde V_{in} é o ponto de conexão com o ponto de medição do excitador e V_o onde o conversor analógico digital é conectado.

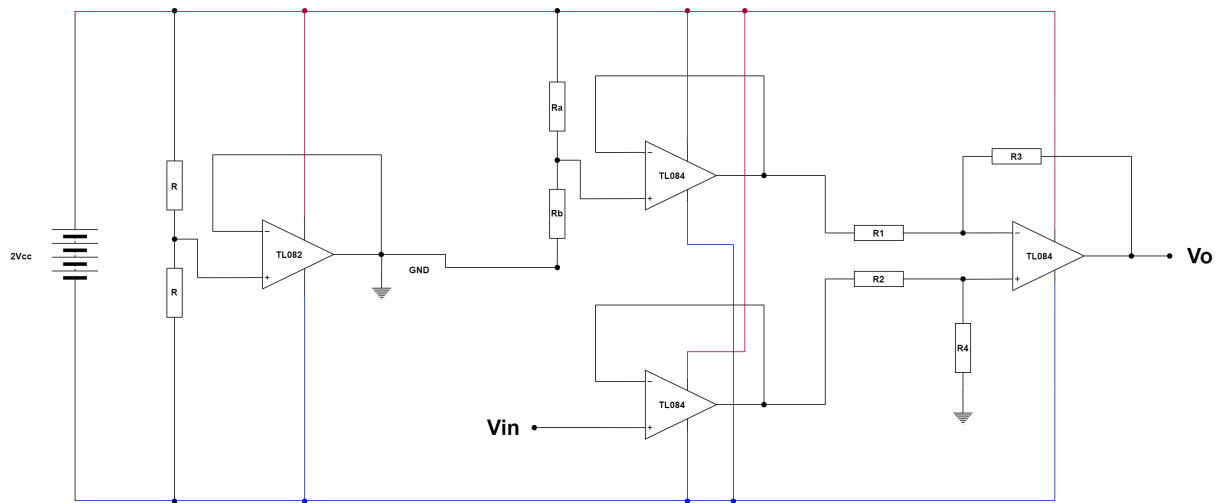


Figura 14: Fonte simétrica utilizada para alimentar os amplificadores operacionais do estágio de medição

4.3 Protótipo Final

O protótipo final foi construído com componentes discretos montados em protoboards, enquanto que o microcontrolador, por facilidade de gravação e comunicação serial, foi utilizado de forma embarcada em um Arduino, como mostrado na figura 15.

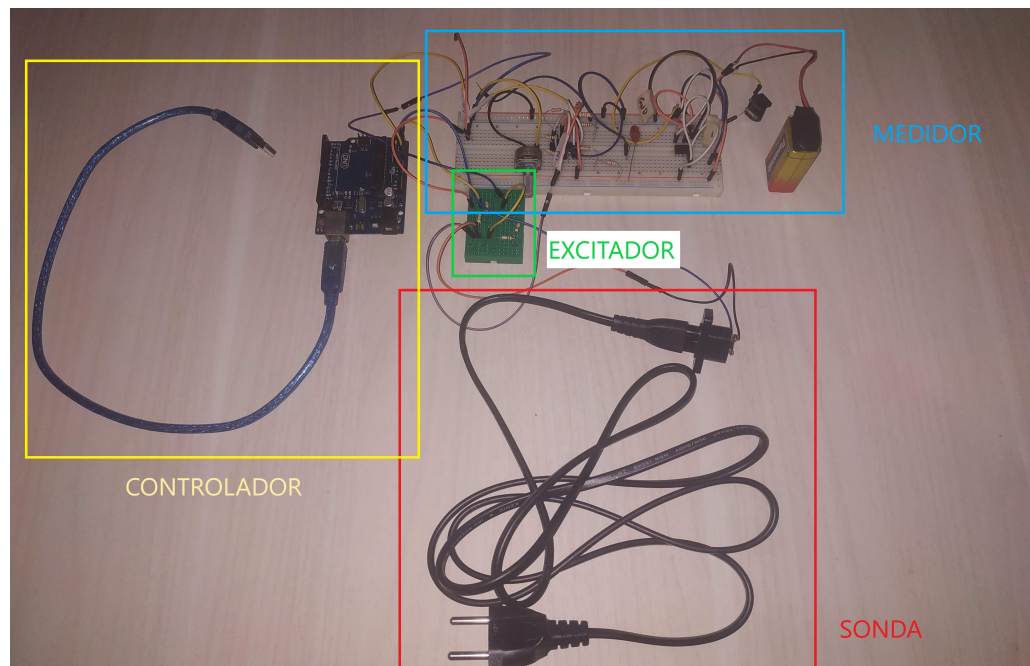


Figura 15: Circuitos prototipados com componentes discretos e protoboards

4.4 Processamento dos Dados

Uma vez obtida a diferença de potencial sobre o fluido em cada ciclo de excitação, é necessário filtrar e aplicar transformações nos dados de forma a extrair a informação sobre o volume de etanol dissolvido na mistura.

Com o objetivo de atenuar ruídos na medição oriundos de uma eventual heterogeneidade no fluido, movimentação da sonda de medição ou alguma interferência eletromagnética espúria, é possível utilizar-se de técnicas de processamento digital para mitigar o erro de estimação do conteúdo da solução.

Empregou-se o cálculo da média das amostras, análogo a um filtro digital passa-baixas, para estabilizar o resultado da medida. Empiricamente constatou-se que 300 amostras, isto é, o equivalente a uma média móvel simples dos últimos 300 elementos da série temporal, é suficiente para estabilizar a medida. A principal fonte de ruído detectada causando uma interferência significativa com o sinal medido foi a própria rede elétrica. Ruído que, pelos testes executados, é captado majoritariamente pelo longo fio que compõe a sonda.

Após a filtragem do sinal medido pelo conversor analógico-digital, transforma-se o valor obtido num valor de tensão multiplicando-se pela tensão de referência do conversor analógico-digital, nesse caso 4.95V. Com a tensão calculada e sabendo-se o tipo de ciclo em que ela foi obtida, é possível calcular-se o valor da resistência do fluido através das formulas (3) e (4).

Uma vez conhecida a resistência do fluido, é possível inferir o conteúdo de etanol através de uma função obtida a partir da interpolação dos dados obtidos experimentalmente através da mensuração de amostras com conteúdo de etanol conhecido.

O processo de obtenção da curva interpolante é feito como parte da elaboração do algoritmo que será executado no microcontrolador, mas não é, em si, parte desse. Para obter-se a função interpolante utilizou-se as medidas feitas a partir das amostras confeccionadas na seção 4.2.1.1, pois através de tais amostras mede-se a resistência de diversas soluções de etanol-gasolina, de forma a estabelecer-se a forma da relação entre essas duas grandezas. Como visto na imagem abaixo (figura 16), a forma aparenta ser uma função exponencial decrescente.

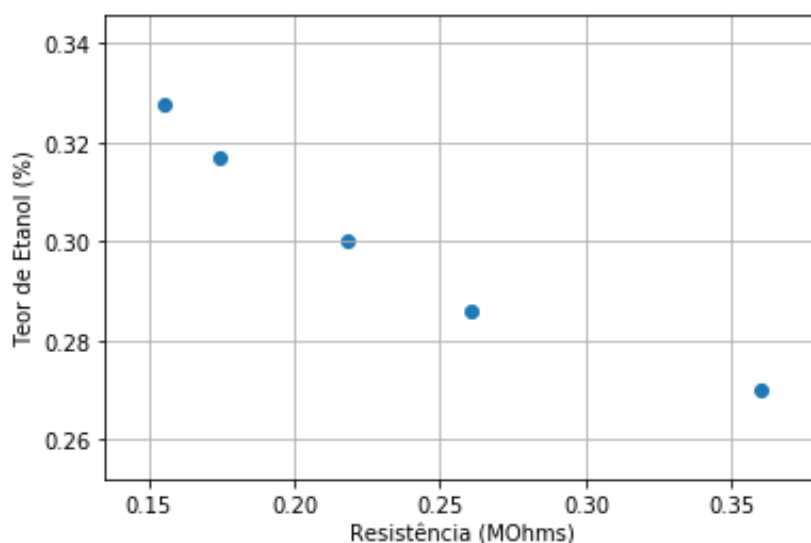


Figura 16: Resistência média das amostras

Uma vez conhecida essa forma, é possível determinar a classe da função interpolante para melhor modelar a relação entre as grandezas. E, uma vez determinada a forma da função interpolante, utiliza-se uma rotina de otimização para encontrar os parâmetros ideais para a função. Nesse caso específico, dado que a forma aparenta ser uma exponencial decrescente, o que corrobora com os resultados obtidos em outros trabalhos, determinou-se a função especificada abaixo para servir de base para interpolação:

$$y = a + be^{-cx} \quad (16)$$

Desenvolveu-se o script abaixo programado em Python, para determinar os parâmetros ótimos:

```

1  import numpy as np
2  from matplotlib.pyplot import plot
3  from scipy.optimize import curve_fit
4
5  # Função interpolante
6  def curve(x, a ,b, c):
7      y = a + b*np.exp(-c*x)
8      return y
9
10 # Amostras para interpolação
11 x = np.array([np.mean([165.87, 144.87]), \
12               np.mean([177.8, 171.63]), \
13               np.mean([218.22, 218.9]), \
14               np.mean([263, 258.4]), \
15               np.mean([373.8, 345.84])])/1000
16 y = np.array([0.3276, 0.317, 0.3, 0.286, 0.27])
17
18 # Cálculo dos parâmetros
19 params, param_cov = curve_fit(curve, x, y)
20 print(params)

```

Obteve-se os seguintes parâmetros ótimos para a função interpolante (tabela 5):

Parâmetro	Valor
a	0.25579478
b	0.24802099
c	7.98099304

Tabela 5: Parâmetros ótimos

Por fim, o algoritmo executado pelo microcontrolador faz apenas o cálculo da função para o valor de resistência do fluido medido durante sua execução, como mostrado nos trechos de código abaixo:

```
1  // Parâmetros da Função Interpolante
2  const float a = 0.25579478;
3  const float b = 0.24802099;
4  const float c = 7.98099304;
5  double e = 2.718281828459045235360287471352; //euler constant
6
7  //...
8
9  // Leitura crua do CAD na 1° parte do ciclo
10 raw = raw/(num_samples/2);
11 // Leitura crua do CAD na 2° parte do ciclo
12 inv_raw = inv_raw/(num_samples/2);
13
14 VdropA = (Vin*raw)/1024.0; // Queda de tensão medida na 1° parte do ciclo
15 VdropB = (Vin*inv_raw)/1024.0; // Queda de tensão medida na 2° parte do ciclo
16
17 // Remoção do vies criado pela instrumentação
18 VdropA_r = (VdropA + offset)/A;
19 VdropB_r = (VdropB + offset)/A;
20
21 //...
22
23 // Cálculo do Rs
24 RsA_r = (R1*VdropA_r)/(Vin-VdropA_r);
25 RsB_r = (R1/VdropB_r)*(Vin-VdropB_r);
26 Rs_r = (RsA_r + RsB_r)/2;
27
28 //...
29
30 // Cálculo do Volume de Etanol
31 double vol_eth = a + b*pow(e, -c*(Rs_r/1000));
```

5 Resultados e Trabalhos Futuros

Após a finalização do protótipo executou-se uma série de medidas das amostras (tabela 6) a fim de determinar-se o desvio padrão da medida de teor alcoólico do dispositivo projetado. No curso das medidas notou-se que a posição da sonda em relação ao recipiente contendo a solução sob medida era a principal fonte de variabilidade nas medidas. Mais especificamente, notou-se que as medidas tendiam a agrupar-se em dois clusters, um formado por medidas com a sonda encostando no fundo do recipiente e outro formado por medidas com a sonda suspensa. Em todos os casos a sonda encontrava-se completamente submersa.

O desvio padrão médio estimado das medida de teor alcoólico foi de 0.64%, ou seja, isso significa que o dispositivo desenvolvido é capaz de determinar com 97.5% de confiança se uma mistura de álcool e gasolina apresenta adulteração de pelo menos 4.7% no teor de álcool, isto é, uma mistura adulterada com teor de álcool de 28.28% será detectada como adulterada em 975 de 1000 testes.

Embora o resultado tenha sido positivo e já apresente utilidade prática, acredita-se ser possível resultados ainda mais precisos visto que grande parte da variabilidade da medida parece ser oriunda de um não distanciamento padrão entre as paredes do recipiente e os eletrodos da sonda. Acredita-se que o acoplamento de uma gaiola protetiva em plástico resistente à gasolina resolveria tal problema e fica como sugestão para trabalhos futuros.

Além disso, durante o curso do desenvolvimento do trabalho, enfrentou-se um problema de 'envelhecimento' das amostras, isto é, com o passar do tempo (ou outro fator desconhecido) as amostras apresentaram resistividade decrescente, o que requereu a confecção de múltiplos conjuntos de amostras ao longo dos meses. Esse fenômeno oferece um grande desafio para medição de soluções cujo tempo de armazenamento é desconhecido, pois a curva de referência gerada a partir de amostras novas se torna inutilizável.

Por fim, desde a literatura é conhecida a influência da temperatura na resistividade das soluções de gasolina e etanol, portanto, um passo necessário para tornar esse protótipo mais robusto é a medição conjunta da temperatura e sua consideração no cálculo do teor alcoólico.

Concentração Volumétrica de Etanol Nominal	Medidas feitas com sonda padrão	Desvio Padrão
27 %	26.84% 27.00% 26.97% 27.43% 27.44% 28.57% 28.59% 27.15% 28.36%	0.67%
28.6 %	28.62% 28.73% 29.76% 28.81% 28.83% 29.2 % 29.21% 30.14% 30.00%	0.54%
30.0 %	29.93% 29.9 % 31.34% 30.08% 30.03% 30.25% 30.28% 31.9 % 31.42%	0.72%
31.7 %	31.58% 31.88% 33.16% 31.92% 31.9 % 32.7 % 32.72% 33.7 % 34.04%	0.82%
32.7 %	32.18% 33.38% 33.75% 32.8 % 32.78% 32.85% 32.86% 33.38% 32.61%	0.45%
Desvio Padrão Médio		0.64%

Tabela 6: Medidas feitas para avaliação do erro padrão

6 Apêndice

6.1 Código do Controlador

```
1  int ECPin= A0;
2  int ECGround=A1;
3  int ECPower =A4;
4  float Vin = 4.95;
5  int R1 = 200; // kOhm
6  int num_samples = 100;
7  int period = 2960; //+ 244us = 3200us
8  double A = 2.63;
9  double offset = 3.95;
10
11 // RsxVol Curve coefs
12 const float a = 0.25579478;
13 const float b = 0.24802099;
14 const float c = 7.98099304;
15 //euler constant
16 double e = 2.718281828459045235360287471352;
17
18 void setup() {
19     pinMode(ECPin,INPUT);
20     //Setting pin for sourcing current
21     pinMode(ECPower,OUTPUT);
22     //setting pin for sinking current
23     pinMode(ECGround,OUTPUT);
24     digitalWrite(ECGround,LOW);
25     digitalWrite(ECPower,LOW);
26     Serial.begin(9600);
27     Serial.println("Start Serial Comm");
28     Serial.print("Using R1: ");
29     Serial.println(R1);
30 }
31
32 void loop() {
33     unsigned long time1;
34     unsigned long time2;
35     time1 = micros();
36     double raw = 0;
37     double inv_raw = 0;
38     float Vdrop, VdropA, VdropB, VdropA_r
39     float VdropB_r, Vdrop_inv;
40     bool flag_cycle = true;
41     for(int i = 0; i < num_samples; i++)
42     {
43         if (flag_cycle == true) {
44             time1 = micros();
```

```

45     digitalWrite(ECPower,HIGH);
46     delayMicroseconds((9*period)/10);
47     float holder = analogRead(ECPin);
48     // This is not a mistake, first reading will be low
49     // because of charged a capacitor
50     raw = raw + analogRead(ECPin);
51     delayMicroseconds(period/10);
52     digitalWrite(ECPower,LOW);
53     time2 = micros();
54     flag_cycle = false;
55 } else {
56     digitalWrite(ECGround,HIGH);
57     delayMicroseconds(period/2);
58     float holder = analogRead(ECPin);
59     int inv_read;
60     // This is not a mistake, first reading will be low
61     // because of charged a capacitor
62     inv_read = analogRead(ECPin);
63     inv_raw = inv_raw + inv_read;
64     delayMicroseconds(period/2);
65     digitalWrite(ECGround,LOW);
66     flag_cycle = true;
67 }
68 }
69
70 raw = raw/(num_samples/2);
71 inv_raw = inv_raw/(num_samples/2);
72
73 VdropA = (Vin*raw)/1024.0;
74 VdropB = (Vin*inv_raw)/1024.0;
75
76 VdropA_r = (VdropA + offset)/A;
77 VdropB_r = (VdropB + offset)/A;
78
79 double Rs, RsA, RsB, Rs_r, RsA_r, RsB_r;
80 RsA = (R1*VdropA)/(Vin-VdropA);
81 RsB = (R1/VdropB)*(Vin-VdropB);
82 Rs = (RsA + RsB)/2;
83
84 RsA_r = (R1*VdropA_r)/(Vin-VdropA_r);
85 RsB_r = (R1/VdropB_r)*(Vin-VdropB_r);
86 Rs_r = (RsA_r + RsB_r)/2;
87
88 bool debug = true;
89 if (Serial.available()) {
90     if (debug == true) {
91         Serial.print("VdropA: ");
92         Serial.println(VdropA);

```

```

93     Serial.print("VdropB: ");
94     Serial.println(VdropB);
95     Serial.print("VdropA_r: ");
96     Serial.println(VdropA_r);
97     Serial.print("VdropB_r: ");
98     Serial.println(VdropB_r);
99     Serial.print("RsA_r: ");
100    Serial.println(RsA_r);
101    Serial.print("RsB_r: ");
102    Serial.println(RsB_r);
103    Serial.print("Rs_r: ");
104    Serial.println(Rs_r);
105    Serial.print("RsA: ");
106    Serial.println(RsA);
107    Serial.print("RsB: ");
108    Serial.println(RsB);
109    Serial.print("Rs: ");
110    Serial.println(Rs);
111 }
112 double vol_eth = a + b*pow(e, -c*(Rs_r/1000));
113 Serial.print("Vol. Etanol: ");
114 Serial.println(vol_eth*100,2);
115 if (vol_eth >= 0.2828) {
116     Serial.println("GASOLINA ADULTERADA!");
117 } else {
118     Serial.println("GASOLINA NÃO ADULTERADA");
119 }
120 Serial.read();
121 }
122 }

```

6.2 Script para determinação do Desvio Padrão

```
1  # Medidas
2  medidas = np.array([curve(np.array([165.87, 144.87, 139.14, 154.7, 154.89, \
3      153.7, 153.66, 144.99, 158.03])/1000, *params),
4      curve(np.array([177.8, 171.63, 148.6, 170.92, 171.21, \
5      156.3, 155.98, 139.92, 134.69])/1000, *params),
6      curve(np.array([218.22, 218.9, 183, 213.88, 215.30, \
7      209.12, 208.31, 171.32, 181.29])/1000, *params),
8      curve(np.array([263, 258.4, 223, 255.34, 254.72, \
9      241.08, 240.63, 212.32, 216.04])/1000, *params),
10     curve(np.array([373.8, 357.96, 361, 325.01, 324.48, \
11     265.02, 264.35, 345.84, 274])/1000, *params)])
12  # Cálculo do Desvio Padrão por amostra
13  stds = np.std(medidas*100, axis=1)
14
15  # Média do desvio padrão de todas as amostras
16  avg_std = np.mean(stds)
```

Referências

- [1] *Analog-to-digital converter*. en. Page Version ID: 976907402. Set. de 2020. URL: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Analog-to-digital_converter&oldid=976907402 (acedido em 21/09/2020).
- [2] *ATmega328P Complete Datasheet*. en. Page Version ID: 975088632. Ago. de 2020. URL: https://www.waveshare.com/w/upload/9/93/ATmega328P_datasheet_Complete.pdf (acedido em 21/09/2020).
- [3] *Bioelectrical impedance analysis*. en. Page Version ID: 958326300. Mai. de 2020. URL: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Bioelectrical_impedance_analysis&oldid=958326300 (acedido em 04/06/2020).
- [4] Emily Nery Diogo de Oliveira. *Combustível adulterado: danos silenciosos e irreversíveis ao automóvel - AUTO ESPORTE — Notícias*. Fev. de 2019. URL: <https://revistaautoesporte.globo.com/Noticias/noticia/2019/07/combustivel-adulterado-danos-silenciosos-e-irreversiveis-ao-automovel.html> (acedido em 14/08/2019).
- [5] *Electrical resistivity tomography*. en. Page Version ID: 958067368. Mai. de 2020. URL: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Electrical_resistivity_tomography&oldid=958067368 (acedido em 04/06/2020).
- [6] *Geofísica Ambiental*. URL: <https://www.iag.usp.br/siae98/geofisica/geofambiental.htm> (acedido em 04/06/2020).
- [7] Bassem Ibrahim, Drew A. Hall e Roozbeh Jafari. “Bio-impedance spectroscopy (BIS) measurement system for wearable devices”. Em: *2017 IEEE Biomedical Circuits and Systems Conference (BioCAS)* (2017). DOI: 10.1109/BIOCAS.2017.8325138.
- [8] *Intensive and extensive properties*. en. Page Version ID: 960408370. Jun. de 2020. URL: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Intensive_and_extensive_properties&oldid=960408370 (acedido em 04/06/2020).
- [9] Ramona Ordonez. *Quadrilhas usam chips para alterar volume em bombas de combustível - Jornal O Globo*. URL: <https://oglobo.globo.com/economia/quadrilhas-usam-chips-para-alterar-volume-em-bombas-de-combustivel-21518786> (acedido em 14/08/2019).
- [10] *Quantization (signal processing)*. en. Page Version ID: 975088632. Ago. de 2020. URL: [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Quantization_\(signal_processing\)&oldid=975088632](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Quantization_(signal_processing)&oldid=975088632) (acedido em 21/09/2020).
- [11] M Rocha e J Simoesmoreira. “A simple impedance method for determining ethanol and regular gasoline mixtures mass contents”. en. Em: *Fuel* 84.4 (mar. de 2005), pp. 447–452. ISSN: 00162361. DOI: 10.1016/j.fuel.2004.09.011. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0016236104002790> (acedido em 21/09/2020).
- [12] *What Is Electrolysis — Reactions — Chemistry — FuseSchool*. URL: https://www.youtube.com/watch?v=7uIIq_0fzgw&ab_channel=FuseSchool-GlobalEducation (acedido em 21/09/2020).