

# **ANÁLISE E INTEGRAÇÃO DE SENsoRES PARA MONITORAMENTO DE BIOPROCESSOS BASEADO EM ARDUINO E LÓGICA FUZZY**

**Rostam Monteiro Lôbo Souza da Silva<sup>1</sup>, Rodrigo de Paula Monteiro<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Escola UNICAP ICAM TECH - Universidade Católica de Pernambuco (UNICAP)  
Rua do Príncipe, 526, Boa Vista  
Recife, Pernambuco, Brasil

{rostam.2018202786, rodrigo.paula}@unicap.br

**Resumo.** Os biorreatores desempenham um papel fundamental em diversos campos, como biotecnologia, saúde e proteção ambiental, nos quais são essenciais para processos biológicos. O monitoramento e controle dos parâmetros dos biorreatores são de extrema importância para garantir o sucesso dos processos fermentativos, como por exemplo a fermentação submersa que utiliza leveduras. Diante dessa necessidade, o objetivo deste estudo é desenvolver uma análise de sensores de baixo custo como o de temperatura, pH e dióxido de carbono conectados ao microcontrolador arduino e a lógica fuzzy. A proposta busca reduzir os custos, facilitar a análise de dados e o controle de bioprocesso, ao mesmo tempo que melhora o rendimento e a qualidade dos bioproductos. Em resumo, este estudo apresenta uma solução acessível e eficiente para laboratórios de pesquisa em biotecnologia.

**Palavras-Chave:** Sensores, Arduino, Lógica Fuzzy, Baixo Custo, Monitoramento.

**Abstract.** Bioreactors play a key role in various fields such as biotechnology, health and environmental protection, where they are essential for biological processes. The monitoring and control of bioreactor parameters is extremely important to ensure the success of fermentative processes, such as submerged fermentation using yeast. Given this need, the objective of this study is to develop an analysis of low cost sensors such as temperature, pH and carbon dioxide connected to the arduino microcontroller and fuzzy logic. The proposal seeks to reduce costs, facilitate data analysis and bioprocess control, while improving the yield and quality of bioproducts. In summary, this study presents an affordable and efficient solution for biotechnology research laboratories.

**Keywords:** Sensors, Arduino, Fuzzy Logic, Low Cost, Monitoring.

## 1. INTRODUÇÃO

Os Biorreatores são equipamentos que se utilizam de bioprocessos conduzidos por microrganismos para transformar matéria-prima em produtos, como: etanol, vinagre, insulina, vacina, entre outros. Essa transformação geralmente é feita através de processos fermentativos. Com o passar do tempo, evoluíram tanto em termos de estrutura física quanto de sistemas para monitoramento e controle de processos, e hoje são aplicados em áreas tão diversas como: biotecnologia, saúde, proteção ambiental e exploração espacial (LI et al., 2016; PIRASACI et al., 2017; CHRISTOFFERSSON; MANDENIUS, 2019, WANG et al, 2020).

Os Biorreatores, são recipientes passíveis de monitoramento e análise de parâmetros, como: temperatura, pH e dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), entre outros parâmetros. A importância dos mesmos na análise e monitoramento dos biorreatores é grande. A temperatura, por exemplo, garante que o microrganismo cresça de maneira adequada e é uma forma de indução para obter um produto de interesse. O pH interfere no crescimento celular e no rendimento do processo. O CO<sub>2</sub> exerce efeitos inibitórios significativos sobre diversos processos microbianos.

Em universidades públicas e privadas, laboratórios de pesquisa em biotecnologia, mesmo tendo todos os aparatos tecnológicos, necessitam de uma grande quantidade de biorreatores com sensores e controladores de variáveis de bioprocessos, como os de temperatura, pH e dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). Estes dispositivos geralmente apresentam custos elevados, podendo chegar até 90 mil reais em alguns casos(MFRURAL; INDUPROPIL, 2023), como sua demanda é relativamente alta para pesquisas, bolsistas de pós-doutorado, doutorado, mestrado e iniciação científica. O processo de criação de um biorreator laboratorial a partir de sensores associados a microcontroladores como o arduino e juntamente com lógica *fuzzy* pode diminuir os custos de compra de um equipamento de tamanho industrial e facilitar a análise de dados e o controle do bioprocesso, contribuindo assim para reduzir custos de produção e aumentar o rendimento e qualidade de bioproductos(SHIMIZU; YE; 1995, DA COSTA ALBUQUERQUE et al., 2008;).

Lofti A. Zadeh(ZADEH, 1965, 1988, 1999;) na época de 1960 trabalhando com inteligência artificial, propôs uma teoria alternativa de conjuntos, a teoria dos conjuntos *fuzzy*. Muitos trabalhos envolvendo a aplicação de controladores *fuzzy* têm indicado que esta técnica é uma importante ferramenta para processos complexos (LEE, 1990). Quando se fala na análise e controle de meios a partir de bioprocessos, o controle clássico apresenta limitações de desempenho quando o processo apresenta alta complexidade, onde não-linearidades e o comportamento transiente estão presentes, como por exemplo, bioprocessos em batelada(LEITE et al, 2010).

Portanto, no presente trabalho foi feita a utilização de sensores de baixo custo associados ao microcontrolador arduinoUNO e o sistema de inferência *fuzzy* (SIF), visando reduzir o custo e facilitar a aquisição de simulações no monitoramento de bioprocessos de temperatura, ph e dióxido de carbono. A expectativa é que os gráficos gerados do toolbox de lógica *fuzzy* do MatLab (MATLAB, 2023) a partir dos dados gerados e analisados pelos sensores sejam

capazes de classificar os bioprocessos, tornando-se potenciais recursos de análise para prever dados futuros.

O restante do trabalho foi desenvolvido na correlação das seguintes etapas. A seção 2 discute os conceitos teóricos importantes relacionados. A seção 3 descreve estudos presentes na literatura relacionados ao tema deste artigo. Na seção 4, a metodologia utilizada na montagem e testes dos sensores específicos, enquanto os resultados fornecidos pela análise dos mesmos está presente na seção 5. Finalmente na seção 6 apresenta as considerações finais deste trabalho.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO

### 2.1- Arduino

O arduino é uma plataforma que foi construída para promover a interação física entre o ambiente e o computador, utilizando dispositivos eletrônicos de forma simples e baseada em softwares e hardwares livres. Basicamente, a plataforma consiste em uma placa de circuitos com entradas e saídas para um microcontrolador AVR, um ambiente de desenvolvimento e o *bootloader* que já vem gravado no microcontrolador (Arduino,2023).

O microcontrolador é constituído de um microprocessador, memória e periféricos de entrada/saída. Ele pode ser programado para funções específicas, como, por exemplo, o controle de máquinas e diferentes automações. Existem outras plataformas construídas para microcontroladores, mas o arduino tem se destacado no cenário mundial pela facilidade de programação, versatilidade e baixo custo. Mesmo para os que desejam interações de alto nível, o arduino tem atendido às expectativas (CAVALCANTE et al. ,2011).

### 2.2-Lógica Fuzzy

A teoria *fuzzy* é uma extensão da lógica booleana, apresentada pela primeira vez em 1965, por Lofti A. Zadeh, professor do Departamento de Engenharia Elétrica e Ciências da Computação da Universidade de Berkeley, Califórnia, para tratar do aspecto vago da informação (MALUTTA, 2004). Essa teoria manifesta-se em uma lógica denominada *fuzzy*, que é multivalorada, isto é, reconhece diversos valores, assegurando que a verdade é uma questão de ponto de vista ou de graduação. Tendo assim o objetivo de expressar o conceito de verdade parcial, podendo determinar valores entre o limite de “completamente verdadeiro” e “completamente falso” tendo assim um valor lógico difuso no intervalo de 0 a 1. A lógica *fuzzy* se torna importante na medida de fatores que não são constituídos de fatos absolutamente verdadeiros ou falsos.

O sistema de inferência *fuzzy* tem uma série etapas : **1-Fuzzificação:** traduz as informações das variáveis de entrada por meio de conjuntos *fuzzy* e assim são associadas a termos linguísticos que representam os estados desta variável e, a cada termo linguístico, deve ser associado um conjunto *fuzzy* por uma função de pertinência; **2-Inferência:** constitui o núcleo do sistema, é nele onde se armazenam as variáveis e suas classificações linguísticas. É o módulo onde se definem quais são os conectivos lógicos usados para estabelecer a relação *fuzzy* que modela a base de regras. É deste módulo que depende o sucesso do sistema *fuzzy* já que ele fornecerá a saída (controle) *fuzzy* a ser adotado pelo controlador a partir de

cada entrada *fuzzy*; **3-Defuzzificação**: traduz o estado da variável (termo linguístico) de saída *fuzzy* para um valor numérico.

### 3. TRABALHOS RELACIONADOS

Em pesquisas na literatura com as melhores contribuições em relação à sensores, arduino e lógica *fuzzy*. Pode-se destacar o trabalho de Marinescu e Popescu(MARINESCU et al ,2018) que foi projetado o desenvolvimento de um controlador de biorreator com código aberto para o crescimento microbiano em suspensão utilizando arduino. Onde protótipo desenvolvido se mostrou eficaz no controle de fatores ambientais da cultura bacteriana,no registro de parâmetros da cultura e em sua curva de crescimento. Finalmente, o protótipo demonstrou ser uma alternativa viável devido à sua flexibilidade na criação de um controlador mais econômico em comparação com as opções disponíveis no mercado.

No trabalho realizado por Maycon J. C. Mesquita(MAYCON et al,2014), realiza um procedimento de controle manual de equipamentos residenciais através de um sistema web. Em outro trabalho apresentado por da Silva (DA SILVA,2013), uma solução de automação residencial baseado em arduino, onde foi feito o controle de iluminação, abertura e fechamento de portas, alarmes e câmeras. E dentre os trabalhos citados o de Marinescu e Popescu se adapta melhor em relação ao tema do trabalho que está sendo desenvolvido, pois tratam de um sistema de monitoramento e controle inteligente para tomada de decisão.

### 4 . MATERIAL E MÉTODOS

A metodologia adotada neste estudo abrange uma sequência de seis fases inter-relacionadas, conforme demonstrado na Figura 1. As etapas incluem o estudo e avaliação dos materiais, montagem dos materiais, teste dos sensores, coleta de dados, aplicação da lógica *fuzzy* e análise dos resultados.

**Figura 1-** Etapas realizadas no desenvolvimento do projeto.



**Fonte:** Autoria própria,2023.

#### 4.1- Microcontrolador UNO

O **Arduino Uno<sup>1</sup>** R3 é uma placa baseada no microcontrolador ATmega328. Ele tem 14 pinos de entrada/saída digital (dos quais 6 podem ser usados como saídas PWM), 6 entradas analógicas, um cristal oscilador de 16MHz, uma conexão USB, uma entrada de alimentação,

<sup>1</sup> Imagem do Microcontrolador arduino Uno em: <https://github.com/rostamlob/TCC/tree/main/Tcc-Rostam%20Lobo/Sensores>

uma conexão ICSP e um botão de reset. Ele contém todos os componentes necessários para suportar o microcontrolador ATmega328.

#### **4.2- Sensor De Temperatura DS18B20**

O sensor de temperatura **DS18B20**<sup>2</sup>, é um dispositivo de medição de temperatura preciso, de baixo custo e de fácil uso. Sua faixa de precisão de medição de temperatura é de -55°C a 125°C. É composto por um fio, o que significa que ele só precisa de uma conexão para fornecer energia, transmitir dados e se comunicar com outros dispositivos.

#### **4.3- Sensor De pH ph-4502c**

O sensor de pH **ph-4502c**<sup>3</sup> com leitura analógica, juntamente com o eletrodo de pH via conector BNC, para realização de leituras em ambiente líquido, a conexão é simples. É realizada através dos 6 pinos localizados na lateral oposta ao conector BNC, sendo 2 GND, 1 VCC, 1 saída analógica de pH, 1 saída de 3.3V e 1 saída de temperatura, que funciona com o sensor LM35. Dessa forma, é possível fazer uma correção para o pH.

#### **4.4- Sensor De Gás MQ-135**

O sensor de gás **MQ-135**<sup>4</sup> funciona da seguinte maneira: quando a concentração de gases nocivos a saúde como amônia (NH<sub>3</sub>), óxidos de nitrogênio (NOx), benzeno (C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), etanol (C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>O) e/ou fumaça ficam acima do nível ajustado pelo potenciômetro, a saída digital DOUT fica em estado alto. Se estão abaixo do nível, ficam em estado baixo.

#### **4.5- Especificações Técnicas e Viabilidade econômica dos Sensores**

Segue abaixo na Figura 2 a tabela das especificações técnicas dos sensores de temperatura, pH e dióxido de carbono. Juntamente com sua viabilidade econômica.

**Figura 2** - Tabela de algumas especificações técnicas e valores

	Modelo	Tensão	Precisão	Tempo de resposta	Preço
Sensor De Temperatura DS18B20	DS18B20	3.0-5.5V±0.1V	±0.5°C na faixa de -10 a +85°C	<750ms	R\$: 15
Sensor De Gás MQ-135	PH-4502C	5.0V±0.1V	10 ~ 1000ppm	1s	R\$: 25
Sensor De pH ph-4502c	MQ-135	5V ±0.2V	0,00 ~ 14,00 pH	5s	R\$: 60
Kit Arduino	ARDUINO UNO	5.0V	Velocidade do Clock: 16MHz		R\$: 63
Total					R\$:163

**Fonte:** Autoria própria,2023.

#### **4.6- Montagem Individual dos Sensores**

##### **4.6.1- Montagem do sensor de temperatura DS18B20**

Como o sensor DS18B20 é um sensor de temperatura funciona pelo protocolo 1-wire, sua montagem presente na Figura 3, programação baseada em C/C++ -Cujo código está no Github<sup>5</sup>- sua montagem ficou da seguinte forma.

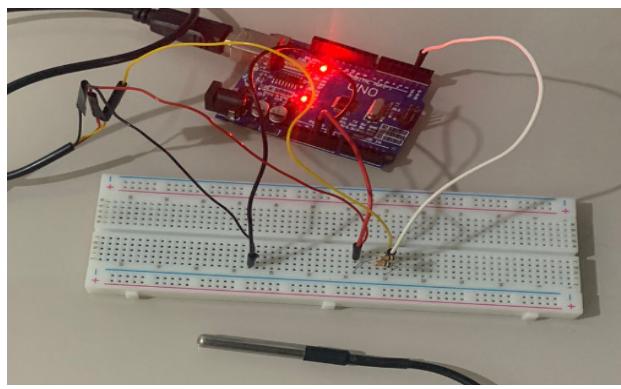
**Figura 3** - Esquema de montagem do sensor de temperatura DS18B20

<sup>2</sup> Imagem do sensor de temperatura em : <https://github.com/rostamlobo/TCC/tree/main/Tcc-Rostam%20Lobo/Sensores>

<sup>3</sup> Imagem do sensor de pH em : <https://github.com/rostamlobo/TCC/tree/main/Tcc-Rostam%20Lobo/Sensores>

<sup>4</sup> Imagem do sensor de Gás em: <https://github.com/rostamlobo/TCC/tree/main/Tcc-Rostam%20Lobo/Sensores>

<sup>5</sup> Código do sensor de temperatura disponível em : <https://github.com/rostamlobo/TCC>



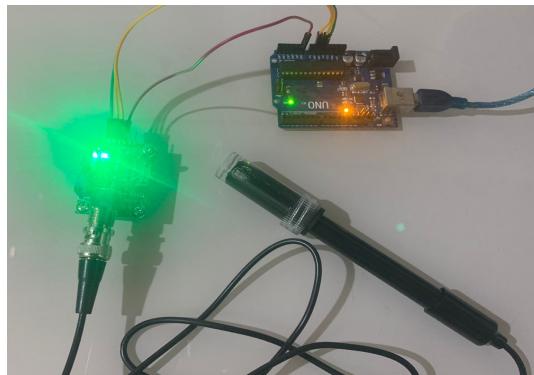
**Fonte:** Autoria própria,2023.

O seguinte esquema na figura acima foi utilizado um microcontrolador arduino UNO, dois resistores de 10k ohms, fio branco conectado à porta digital, fio vermelho para os 5v do microcontrolador e o preto para o GND conectados ao sensor DS18B20 pela protoboard.

#### **4.6.2- Montagem do sensor de pH ph-4502c**

O sensor **ph-4502c** é um sensor de potencial de hidrogênio e realiza medições de 0 a 14 pH, sua montagem presente na Figura 4, programação baseada em C/C++ -Cujo código está no Github<sup>6</sup>- e a montagem ficou da seguinte forma.

**Figura 4 -** Esquema de montagem do sensor de Ph ph-4502c



**Fonte:** Autoria própria,2023.

O sensor foi montado na figura acima utilizando um microcontrolador arduino UNO, e conectando seus respectivos cabos de conexão (leitor digital , conector 5v e dois cabos para GND).

#### **4.6.3- Montagem do sensor de Co2 MQ-135**

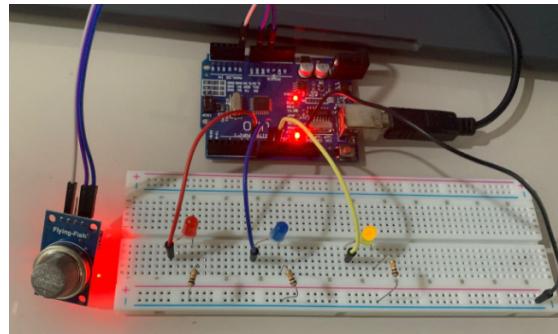
Como o sensor MQ-135 é um sensor de gás que funciona de uma forma simples sem precisar ser conectado com outro aparelho ou ser feita uma calibração específica, por isso com a programação baseada em C/C++ -Cujo código está no Github<sup>7</sup>- e sua montagem ficou como esquematizado na Figura 5.

---

<sup>6</sup> Código do sensor de ph disponível em : <https://github.com/rostamlobo/TCC>

<sup>7</sup> Código do sensor de co2 disponível em : <https://github.com/rostamlobo/TCC>

**Figura 5** - Esquema de montagem do sensor de gás MQ-135



**Fonte:** Autoria própria,2023.

O MQ-135 juntamente com 3 leds,uma placa arduino Uno, 3 resistores de 220 Ohms e o pino analógico A0, são responsáveis por ler os dados do sensor que está conectado aos leds amarelo, azul e vermelho.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

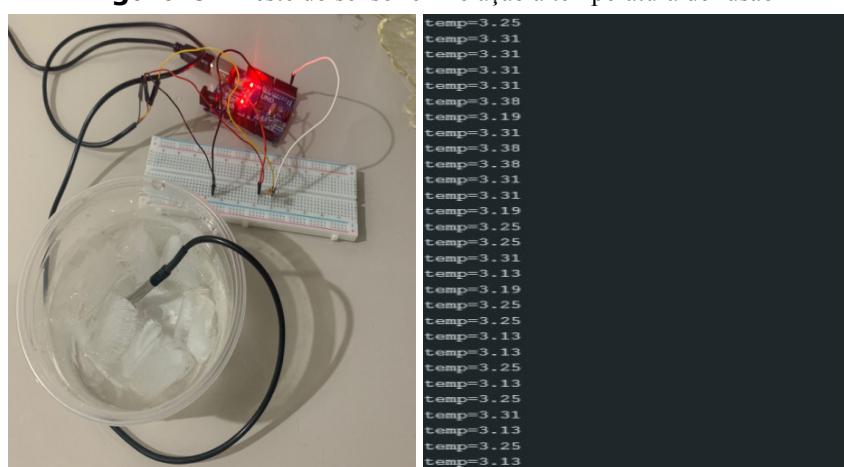
### 5.1- Testes dos sensores

Os testes dos sensores visam avaliar o ambiente a fim de solucionar os fluxos básicos, garantindo a estabilidade e a capacidade analítica dos sensores.

#### 5.1.1- Teste do sensor de temperatura DS18B20

No monitoramento de temperatura,sabendo que alguns microrganismos reagem de forma diferente em relação à temperatura em que estão inseridos. Os testes realizados com o sensor de temperatura **DS18B20** foram segmentados em duas situações: o primeiro em relação à temperatura de fusão , mergulhado em água fria como demonstrado na Figura 6, à esquerda, e esperando até seu valor estabilizar no valor de 3°C no período de 2-3 minutos como ilustrado na Figura 6, à direita.

**Figura 6** - Teste do sensor em relação a temperatura de fusão



**Fonte:** Autoria própria,2023.

O segundo teste foi em relação a temperatura de ebulição, mergulhado em recipiente retirado do fogo na Figura 7 à esquerda, e esperando estabilizar de 87°C-86°C no período de 1 minuto como na Figura 7 à direita.

**Figura 7 -** Teste do sensor em relação a temperatura de fusão



Fonte: Autoria própria,2023.

### 5.1.2- Teste do sensor de pH ph-4502c

No sensor de ph o processo de calibração foi realizado em três pontos, com soluções de pH 4 (pH ácido), pH 7 (pH neutro) e pH 10 (pH alcalino), foram realizados para calibrar a sonda e posteriormente medir os pH das amostras. A sonda foi lavada com água deionizada e enxuta com papel toalha macio após cada medida de pH usando as diferentes soluções de potencial hidrogeniônico. Na Figura 8 apresentam respectivamente as soluções utilizadas para testar os phs e suas saídas no serial monitor do arduino com cada solução de ph (do mais neutro para o mais ácido, da esquerda à direita).

**Figura 8 -** Soluções utilizadas e saídas dos testes de ph



```

11:12:53.107 -> sensor = 9.88
11:12:53.920 -> sensor = 9.87
11:12:54.730 -> sensor = 9.88
11:12:55.508 -> sensor = 9.88
11:12:56.323 -> sensor = 9.88
11:12:57.136 -> sensor = 9.89
11:12:57.919 -> sensor = 9.88
11:12:58.729 -> sensor = 9.88
11:12:59.511 -> sensor = 9.88
11:13:00.336 -> sensor = 9.88
11:13:01.121 -> sensor = 9.88
11:13:01.938 -> sensor = 9.89
11:13:02.746 -> sensor = 9.89
11:13:03.533 -> sensor = 9.89
11:13:04.348 -> sensor = 9.88
11:13:05.130 -> sensor = 9.87
11:13:05.948 -> sensor = 9.90
10:48:02.060 -> sensor = 7.01
10:48:02.874 -> sensor = 7.00
10:48:03.683 -> sensor = 7.01
10:48:04.496 -> sensor = 7.01
10:48:05.274 -> sensor = 7.00
10:48:06.091 -> sensor = 7.00
10:48:06.871 -> sensor = 7.00
10:48:07.684 -> sensor = 7.01
10:48:08.491 -> sensor = 7.00
10:48:09.299 -> sensor = 7.01
10:48:10.078 -> sensor = 6.99
10:48:10.892 -> sensor = 7.00
10:48:11.710 -> sensor = 7.00
10:48:12.496 -> sensor = 7.01
10:48:13.308 -> sensor = 7.00
10:48:14.087 -> sensor = 7.00
10:48:14.898 -> sensor = 6.98
11:02:03.780 -> sensor = 4.08
11:02:04.594 -> sensor = 4.07
11:02:05.408 -> sensor = 4.07
11:02:06.187 -> sensor = 4.08
11:02:06.995 -> sensor = 4.09
11:02:07.808 -> sensor = 4.08
11:02:08.584 -> sensor = 4.09
11:02:09.407 -> sensor = 4.09
11:02:10.191 -> sensor = 4.07
11:02:11.008 -> sensor = 4.08
11:02:11.799 -> sensor = 4.09
11:02:12.613 -> sensor = 4.08
11:02:13.397 -> sensor = 4.07
11:02:14.216 -> sensor = 4.08
11:02:14.998 -> sensor = 4.07
11:02:15.807 -> sensor = 4.08
11:02:16.623 -> sensor = 4.07

```

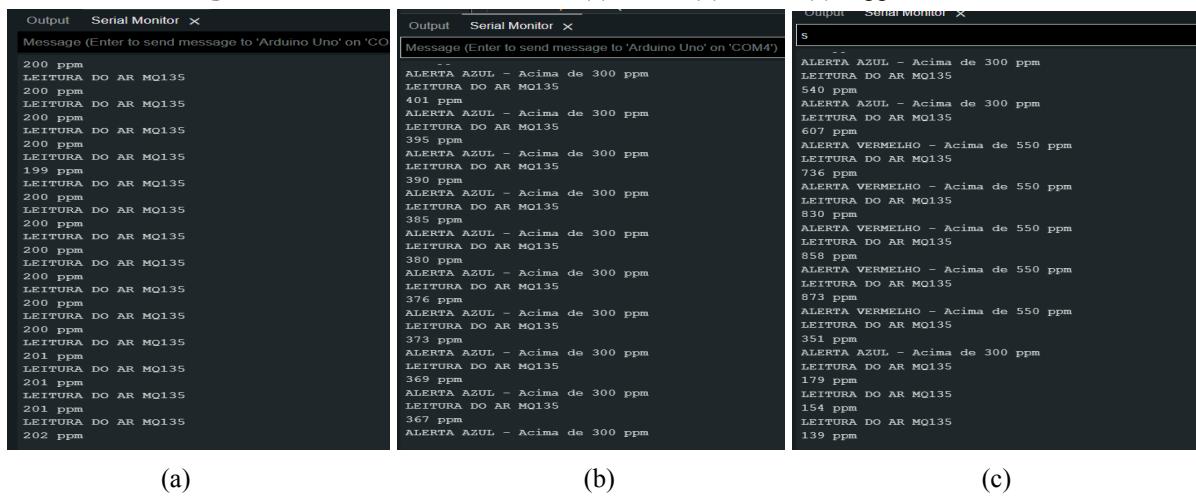
Auto-rolagem  Show timestamp       Auto-rolagem  Show timestamp       Auto-rolagem  Show timestamp

Fonte: Autoria própria,2023.

### 5.1.3- Teste do sensor de Co<sub>2</sub> MQ-135

Para realizar a calibração do sensor, foi utilizado estímulos externos como volatilização de acetona e volatilização de etanol, próximos ao sensor para obter valores em 'ppm' elevados e então poder definir as medidas em níveis (baixo, médio e alto). Nesse primeiro momento, valores abaixo de 300 ppm foram definidos como baixo e valores entre 300 e 550 ppm, foram cotados como um alerta de cuidado e acima de 550 são considerados altos e nocivos. Quando o valor de ppm é inferior a 300, apenas o led amarelo acende, quando está entre 300 e 550, apenas o azul acende. Já quando está acima de 550 ppm , o led vermelho fica piscando e uma mensagem é direcionada para a tela indicando alerta Figura 9.

**Figura 9** - Saída dos níveis baixo (a), médio(b) e altos (c)de ppm do sensor.



Fonte: Autoria própria,2023.

### 5.2- Aplicação da Lógica Fuzzy

Além da montagem dos protótipos e testes dos mesmos , foi implementado o SIF(Sistema de Inferência *Fuzzy*) para realização regras de inferência e representação de gráficos *fuzzy*, no ambiente de desenvolvimento do MatLab(MATLAB,2023) baseado na detecção de valores dos sensores DS18B20,ph-4502c e MQ-135.Como citado anteriormente na seção “2.2” inicialmente foi realizado o processo de “**Fuzzificação**” , onde é feita a criação de termos linguísticos a partir de variáveis de entrada; Logo após foi realizado o processo de “**Inferência**”, no qual é feita a parte lógica do sistema a partir da modelagem de regras feitas; Por fim, a seção de "Defuzzificação" em que ocorre a tradução dos valores linguísticos para valores numéricos, permitindo então a análise e predição de dados.

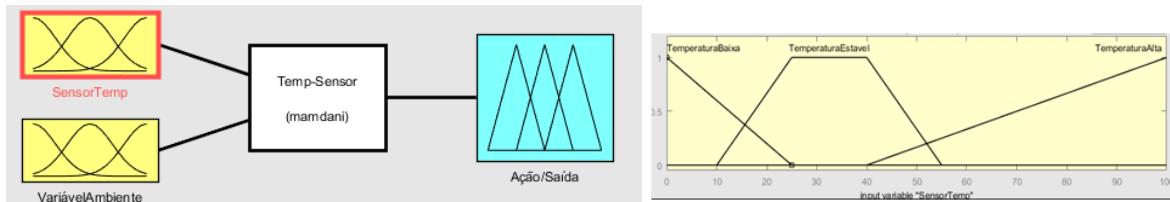
#### 5.2.1- Fuzzificação

Neste primeiro estágio, o problema é analisado e os dados de entrada são transformados em variáveis linguísticas. O fuzzificador atribui valores linguísticos (graus de pertinência), empregando funções de pertinência às variáveis de entrada. As variáveis de entrada podem ser pré-determinadas (variáveis de ambiente) ou geradas automaticamente (variáveis do sensor), e com funções trapezoidais e triangulares, podemos arquitetar uma etapa de pré-processamento dos dados.

O sensor de **temperatura** trabalhou em uma escala de 0°C a 100°C. Com os dados recebidos, foi definida a 'Variável do sensor', na qual foram estabelecidos níveis de

temperatura com base no fator de crescimento de microrganismos, que abrange a faixa de 25°C a 40°C. Foram determinados os seguintes intervalos: 'Baixa' (<25°C - função triangular), 'Estável' (25°C - 40°C - função trapezoidal) e 'Alta' (>40°C - função triangular) presente na Figura 10 à direita.

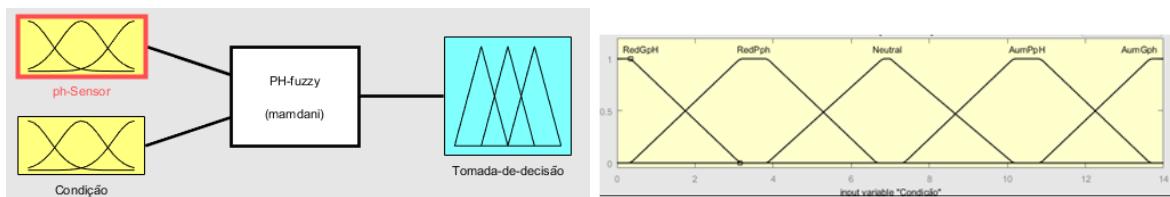
**Figura 10 -** Variáveis de entrada do sensor DS18B20



**Fonte:** Autoria própria,2023.

O sensor de **pH**, trabalhado em ambiente que variou em um ph de 0-14. A “Variável do Sensor” ela foi definida em cinco intervalos, visto que para os valores de potencial de hidrogênio ele trabalha em 3 faixas (ácido, neutro e básico) e os níveis definidos transitam entre a relação dessas faixas de ph, onde no eixo horizontal quanto mais próximo de 0 mais ácido é e quanto mais próximo de 14 mais básico é. Com isso, foram definidos os níveis :(MBX- muito ácido; BX-pouco ácido; NRM-normal;ALT- pouco básico e MALT -muito básico) conforme na Figura 11 à direita.

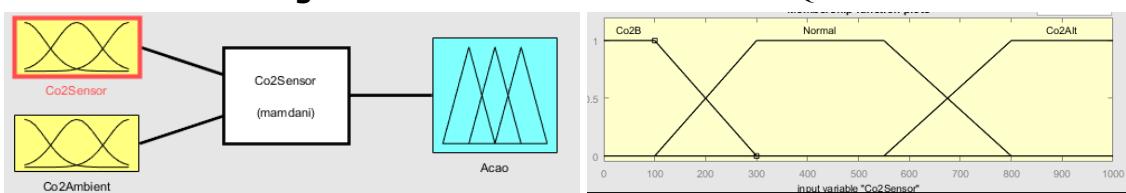
**Figura 11 -** Variáveis de entrada do sensor ph-4502c



**Fonte:** Autoria própria,2023.

E por fim no Sensor de **Dióxido de Carbono**, trabalhou em uma variação de 0-1000 ppm para o ambiente, visto que tanto para a “Variável do Sensor”. E com os dados recebidos, foram definidos três termos linguísticos que foram montados a partir do *range* de ppms coletados( Co2B-Co2 baixo; Normal; Co2Alt- co2 alto) como ilustrado na Figura 12 à direita.

**Figura 12 -** Variáveis de entrada do sensor MQ-135



**Fonte:** Autoria própria,2023.

### 5.2.2- Inferência

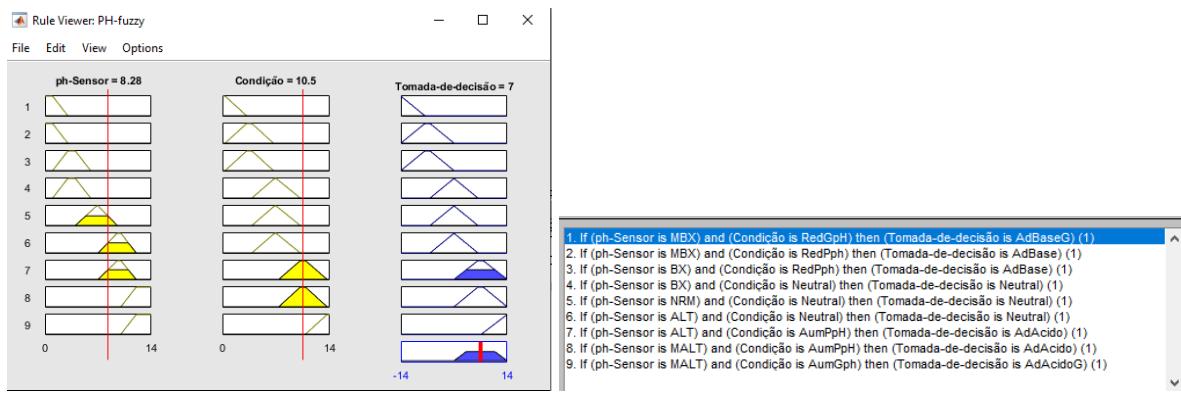
O segundo estágio será utilizado para a criação de regras ou proposições usando as variáveis de entrada e saída fuzzificadas. As proposições são geradas do relacionamento entre as variáveis do modelo e a região *fuzzy*. Essas regras resultantes das associações podem ser

condicionais ou não condicionais (Cox,1994). E tais regras/proposições possuem uma estrutura que parte do princípio de agregação e composição:

**Se ‘x’ é A e ‘y’ é B,então ‘z’ é C.**

Onde, **A** e **B** são os conjuntos *fuzzy* de entrada do sistema relacionados à seção conhecidas como antecedentes ou premissas (dados dos sensores e do ambiente),enquanto **C** é o conjunto *fuzzy* de saída que são relacionados a parte conhecida como consequência ou conclusão.Tais regras podem ser definidas previamente(Variáveis de ambiente) ou alternativamente geradas automaticamente por uma base de dados(Variáveis do sensor), como demonstrado na Figura 13 (a). As proposições podem ser estabelecidas através de proposições simples, utilizando conectivos lógicos “E”, “OU” e “NÃO” representando a intersecção, união e complemento *fuzzy* como demonstrado na criação das regras para o sensor de ph (b) na Figura 13. Demais regras foram disponibilizadas no Github<sup>8</sup>

**Figura 13 - Regras de Inferência dos Sensores**



(a)- Dados esperados pelas regras de inferência

(b)- Regras de inferência do sensor de ph

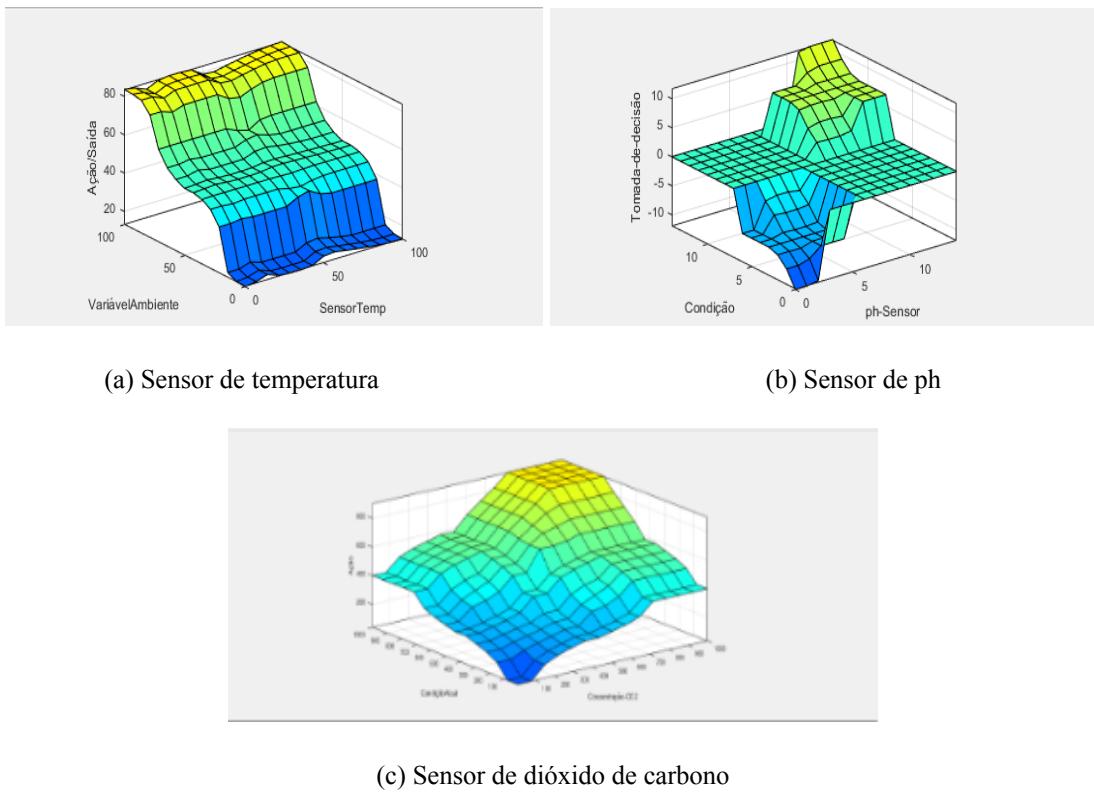
**Fonte:** Autoria própria,2023.

### 5.2.3- Defuzzificação

No processo de defuzzificação, é efetuada a interpretação do conjunto *fuzzy* inferida pelas regras, com o objetivo de obter um valor numérico. E também podemos analisar os gráficos de superfície gerados a partir das regras *fuzzy* dos diferentes níveis de concentração de bioprocessos. Os gráficos bidimensionais gerados pelo *toolbox* de lógica *fuzzy* do matlab ficaram da seguinte forma para o sensor de temperatura (a), ph (b) e o de dióxido de carbono (c) como demonstrado na Figura 14.

<sup>8</sup> Demais regras de inferência : <https://github.com/rostamlobo/TCC>

**Figura 14** -Dados esperados e gráficos gerados no matlab a partir do SIF de cada sensor



**Fonte:** Autoria própria,2023.

### 5.3- Avaliação da Simulação Feita

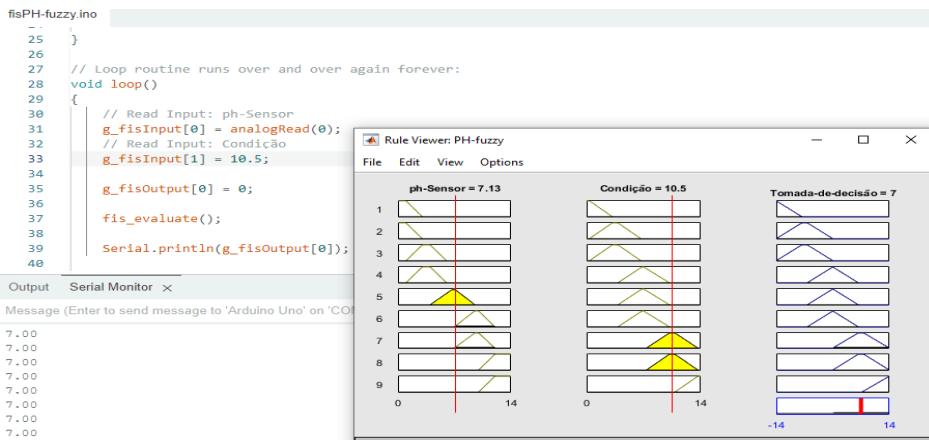
Para garantir uma análise precisa e eficiente do Sistema de Inferência *Fuzzy* (FIS), realizada na seção anterior, e assegurar que pode-se monitorar e avaliar um determinado processo biológico usando sensores de baixo custo, realizamos uma análise de acompanhamento. Assumindo que os dados esperados são os mesmos que os dados existentes na simulação da ação SIF, gerados no processo de inferência do sistema (por exemplo, Figura 13 à esquerda). O SIF é primeiro traduzido para o código C/C++<sup>9</sup>, isso ajuda a analisar a relação entre os dados do sensor em tempo real e as regras de inferência. Para isso, os códigos utilizados para testar os sensores foram convertidos em uma variável que transmite simultaneamente os dados dos sensores para o código. Como resultado, obtivemos a seguinte análise como demonstrado na Figura 15.

- Utilizando como base a análise do sensor de pH, com os dados que são enviados ao código a partir da variável "g\_fisInput[0] = analogRead(0)", e o teste em uma situação ambiente em que o pH esteja em um nível básico, ele nos retornou no "Serial monitor" o mesmo valor presente na tabela de dados esperados do SIF

<sup>9</sup> Código dos 3 SIF's traduzidos para C disponível em : <https://github.com/rostamlob/TCC>

("tomada-de-decisão"). Isso garante que os valores lidos pelo sensor, juntamente com a variável presente no ambiente em que está inserido, retornem o mesmo resultado presente na simulação do sistema de inferência *fuzzy*.

**Figura 15** -Avaliação dos resultados obtidos pelo SIF e dados reais.



**Fonte:** Autoria própria,2023.

Por tautologia, conseguimos saber que, se aplicarmos o mesmo teste realizado anteriormente com os sensores de temperatura e CO<sub>2</sub>, obteremos a mesma análise.

## 6. CONCLUSÃO

Este trabalho analisou a integração de sensores para o monitoramento de bioprocessos utilizando arduino e lógica *fuzzy*. O estudo de viabilidade econômica dos sensores e do arduino, que totalizou-se em 163 reais, mostrou-se bem-sucedido com base nos testes realizados na montagem dos protótipos.

Mesmo com os resultados positivos que o trabalho analisou, houve algumas dificuldades que fizeram os testes dos sensores demorarem mais do que o esperado. A falta de uma estrutura capaz de integrar os 3 sensores para monitoramento simultâneo foi um obstáculo. Isso fez com que a abordagem do trabalho mudasse para a análise individual de cada sensor. No entanto, isso não alterou o fato de que os resultados foram bem-sucedidos.

O sistema implementado possibilitou a coleta de dados em tempo real de diferentes sensores e a aplicação da lógica *fuzzy* para tomar decisões precisas. A geração dos gráficos e regras de inferência *fuzzy*, possibilitaram uma análise mais abrangente quando o comparamos com os dados reais que foram processados fazendo com que a sua escalabilidade e modularidade do sistema facilitam sua implementação em diversas escalas de produção. Essa abordagem promove o aprimoramento do controle e eficiência dos bioprocessos, contribuindo para avanços na automação e otimização dos mesmos.

Para trabalhos futuros, pretende-se implementar e integrar os sensores utilizados na pesquisa (temperatura, pH, dióxido de carbono, pressão e turbidez) em um biorreator de vidro de 5 litros, com um volume útil de 4 litros. O objetivo é operar em condições que visem a criação de uma rede neural para a operação automática do sistema, utilizando arduino e lógica *fuzzy*.

## 7. REFERÊNCIAS

- Arduino. Disponível em: <https://www.arduino.cc/en/Guide/HomePage>. Acesso :26 mai.2023.
- CAVALCANTE, M. A.; TAVOLARO, C. R. C.; MOLISANI, E. **Física com Arduino para iniciantes. Rev. Bras. Ensino Fís.**, São Paulo, v. 33, n. 4, p. 4503, Dec. 2011. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/S1806-11172011000400018> . Acesso em: 26 mai. 2023.
- CHRISTOFFERSSON, J., AND MANDENIUS, C. F. (2019). **Using a microfluidic device for culture and drug toxicity testing of 3D cells**. Methods Mol.Biol. p.235–241, 1994.
- COX, E. **The fuzzy systems handbook: a practitioner's guide to building, using, and maintaining fuzzy systems** . New York: AP Professional, 1994.
- DA COSTA ALBUQUERQUE, C.D.; DE CAMPOS-TAKAKI, G.M. ; FILETI, A.M. **On-line biomass estimation in biosurfactant production process by Candida lipolytica UCP 988**. Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology v.35, n.11, p. 1425-33 , 2008.
- DA SILVA L. T. **Uma proposta de automação residencial utilizando a plataforma de prototipagem eletrônica Arduino. Revista Tecnologias em Projeção.**(2013)
- INDUPROPIIL, Disponível em: <https://www.indupropil.com.br/tanque-bioreator-630-lts-em-pp.html>. Acesso em: 07 jun 2023.
- LEE, C. C. **Fuzzy logic control systems: fuzzy logic controllers\_ Part I**. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, 20(2), 404-418, 1990.
- LEITE, M. S.; FILETI, A. M. F.; SILVA, F. V. **Desenvolvimento e aplicação experimental de controladores fuzzy e convencional em um bioprocessos**. Sba Controle & Automação, Campinas, v. 21, n. 2, p. 147-158, Apr. 2010.
- LI, X., XU, Q., WANG, Y., CHEN, F., AND HE, J. **Development of a new miniaturized bioreactor for axon stretch growth**. J. Integr. Neurosci. v.15, p.365– 380, 2016.
- MALUTTA, C. **Método de apoio à tomada de decisão sobre adequação de aterros sanitários utilizando a Lógica Fuzzy.** 2004. Disponível em:<<http://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/87815>>. Acesso em:25 mai. 2023
- MATLAB,Disponível em: <https://de.mathworks.com/>. Acesso em :25 mai. 2023.
- MAYCON J. C. M., JOSE C. G. NETO, W. R. M. A. **Sistema de controle e supervisão residencial utilizando plataforma Arduino.**(2014).
- MARINESCU GC,POPESCU RG.2018.**Open-Source bioreactor controller for bacterial protein expression**. PeerJ Preprints 6:e27150v1.Disponível em:<<https://doi.org/10.7287/peerj.preprints.27150v1>>. Acesso em: 27 mai. 2023.
- MFRURAL, Disponível em: <https://www.mfrural.com.br/detalhe/614241/bioreator>. Acesso em: 07 jun 2023.
- PIRASACI, T., MANISALI, A. Y., DOGARIS, I., PHILIPPIDIS, G., AND SUNOL, A. K. **Hydrodynamic design of an enclosed Horizontal BioReactor (HBR) for algae cultivation**.Algal.Res. v.28, p.57–65, 2017.
- SHIMIZU, K.; YE, K. **Development of Intelligent Control Systems for Bioreactors**. Computer Application in Biotechnology. p-89-94, 1995.
- WANG, B.; WANG,Z ; CHEN,T.; ZHAO, X. (2020) **Development of Novel Bioreactor Control Systems Based on Smart Sensors and Actuators**. Front. Bioeng. Biotechnol., 04 mai 2023.