

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

ANDERSON SIQUEIRA SILVA

**IMPLEMENTAÇÃO DE AUTOMAÇÃO EM BIORREATORES PARA PRODUÇÃO
DE BIOINSUMOS: UM ESTUDO DE CASO**

CURITIBA

2024

ANDERSON SIQUEIRA SILVA

**IMPLEMENTAÇÃO DE AUTOMAÇÃO EM BIORREACTORES PARA PRODUÇÃO
DE BIOINSUMOS: UM ESTUDO DE CASO**

**Implementation of automation in bioreactors for bioinputs production: a case
study**

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentado como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Elétrica do curso de
Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica
Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador: Dr. Rubem Petry Carbente

CURITIBA

2024



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Esta licença permite compartilhamento, remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

ANDERSON SIQUEIRA SILVA

**IMPLEMENTAÇÃO DE AUTOMAÇÃO EM BIORREATORES PARA PRODUÇÃO
DE BIOINSUMOS: UM ESTUDO DE CASO**

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentado como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Elétrica do curso de
Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica
Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 11/junho/2024

Rubem Petry Carbente
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Carlos Henrique Mariano
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Vilmair Ermenio Wirmond
Mestrado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

CURITIBA

2024

AGRADECIMENTOS

Dedico este trabalho primeiramente a Deus, cuja orientação e bênçãos tornaram todas as minhas conquistas possíveis. Agradeço profundamente aos meus pais, cuja educação e valores foram fundamentais para a minha formação pessoal e profissional. À minha querida esposa, expresso minha eterna gratidão por todo o companheirismo e dedicação, que me sustentaram em cada etapa deste caminho.

Minha gratidão se estende também a todos os professores e funcionários da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, que contribuíram significativamente para o meu aprendizado e desenvolvimento como engenheiro. Em especial, agradeço ao meu orientador, Professor Dr. Rubem Carbete, por sua orientação e apoio inestimáveis ao longo deste projeto.

A todos, meu sincero agradecimento.

RESUMO

O presente estudo aborda a produção de bioinsumos como *Bradyrhizobium*, *Azospirillum*, *Beaveria* e *Isaria* em um biorreator automatizado com a utilização de Controladores Lógicos Programáveis (CLPs). O objetivo principal é avaliar o desempenho desses equipamentos como uma alternativa inovadora aos biorreatores convencionais, visando melhorar a capacidade produtiva e a qualidade dos bioinsumos. A automação se justifica pela necessidade de monitorar variáveis críticas como temperatura, pressão, pH, oxigênio dissolvido, aeração e agitação durante toda a cadeia produtiva para garantir condições favoráveis ao desenvolvimento dos microrganismos. Contudo, o alto custo dos biorreatores convencionais inviabiliza sua aquisição por muitas empresas, que acabam utilizando equipamentos manuais, sujeitos a erros operacionais e controle impreciso das variáveis essenciais. Isso afeta negativamente a qualidade do produto e a capacidade produtiva. Portanto, a automação dos biorreatores manuais a um custo acessível surge como uma estratégia promissora para impulsionar a produtividade e competitividade das empresas. Este estudo, de caráter descritivo e exploratório, detalha o processo de automação de um biorreator manual utilizado na produção de bioinsumos e apresenta os objetivos alcançados com a tecnologia implementada. Os resultados foram analisados qualitativa e quantitativamente, a partir de informações coletadas de fontes primárias e secundárias. A automação garantiu um ambiente de cultivo ideal para os microrganismos, resultando em maior produção de biomassa e compostos bioativos. Sistemas de controle de pH, temperatura, agitação, pressão e nível proporcionaram uma operação mais estável e previsível, maximizando o rendimento do processo biotecnológico. Além disso, a análise dos custos demonstrou que a automação proporcionou uma economia significativa em comparação à aquisição de um novo biorreator automatizado. A customização do projeto de automação atendeu às necessidades específicas do processo e integrou tecnologias existentes na planta industrial, agregando valor e maximizando o retorno sobre o investimento.

Palavras-chave: Bioinsumos; Biorreatores; Automação.

ABSTRACT

The present study addresses the production of bioinputs such as Bradyrhizobium, Azospirillum, Beuveria, and Isaria in an automated bioreactor using Programmable Logic Controllers (PLCs). The main objective is to evaluate the performance of these equipment as an innovative alternative to conventional bioreactors, aiming to improve the productive capacity and quality of the bioinputs. Automation is justified by the need to monitor critical variables such as temperature, pressure, pH, dissolved oxygen, aeration, and agitation throughout the production chain to ensure favorable conditions for the development of microorganisms. However, the high cost of conventional bioreactors makes their acquisition unfeasible for many companies, which end up using manual equipment, subject to operational errors and imprecise control of essential variables. This negatively affects product quality and production capacity. Therefore, automating manual bioreactors at an affordable cost emerges as a promising strategy to boost productivity and competitiveness of companies. This descriptive and exploratory study details the automation process of a manual bioreactor used in bioinput production and presents the objectives achieved with the implemented technology. The results were analyzed qualitatively and quantitatively, based on information collected from primary and secondary sources. Automation ensured an ideal cultivation environment for microorganisms, resulting in higher biomass production and bioactive compounds. pH, temperature, agitation, pressure, and level control systems provided a more stable and predictable operation, maximizing the yield of the biotechnological process. Furthermore, cost analysis demonstrated that automation provided significant savings compared to the acquisition of a new automated bioreactor. The customization of the automation project met the specific needs of the process and integrated existing technologies in the industrial plant, adding value and maximizing return on investment.

Keywords: Bioinputs; Bioreactors; Automation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Estimativa de crescimento global dos produtos biológicos de controle e bioestimulantes.....	20
Figura 2: Esquemático de um biorreator.....	22
Figura 3: Biorreator automatizado.....	23
Figura 4: visão geral de um biorreator automatizado.....	24
Figura 5: Princípio de funcionamento de um sensor strain gauge.....	27
Figura 6: Rotâmetro.....	29
Figura 7: Fluxograma do bioprocesso.....	33
Figura 8: Biorreator.....	39
Figura 9: Bloco DPIDE.....	41
Figura 10: Esquema de conexão dos drivers DM556.....	42
Figura 11: Comportamento do controle PID.....	43
Figura 12: Tela de ajuste controle PID.....	44
Figura 13: PI&D biorreator.....	46
Figura 14: Bloco SCLP.....	47
Figura 15: Tela de controle da agitação.....	48
Figura 16: Bloco DCNT.....	49
Figura 17: Tela de programação ISPSOft.....	54
Figura 18: Tela de programação DopSoft.....	55
Figura 19: Software COMMGR.....	56
Figura 20: EPLAN ELETRIC P8.....	58
Figura 21: Painel de comando.....	59
Figura 22: Orçamento biorreator comercial automatizado.....	65
Fotografia 1: Reator químico.....	25
Fotografia 2: Sensor de temperatura.....	26
Fotografia 3: Sensor de pressão sanitário.....	28
Fotografia 4: Medidor de vazão.....	30
Fotografia 5: Eletrodo de pH.....	32
Fotografia 6: Medidor de vazão instalado.....	50
Fotografia 7: Biorreator do estudo de caso.....	60
Gráfico 1: Divisão de custos do projeto.....	64

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Relação de custos do projeto	63
--	----

SUMÁRIO

1	A PRODUÇÃO DE BIOINSUMOS	10
1.1.1	Delimitação do Tema.....	12
1.2	Problemas e Premissas	12
2	OBJETIVOS	14
2.1	Objetivo geral	14
2.2	Objetivos Específicos	14
2.3	Justificativa	14
2.4	Metodologia	15
3	REFERENCIAL TEÓRICO	18
3.1	Bioinsumos	18
3.2	Biorreatores	20
3.3	Requisitos mínimos para produção de bioinsumos	23
3.4	Controle e instrumentos para um bioprocessos	25
3.4.1	Sensor de temperatura	25
3.4.2	Sensor de pressão	26
3.4.3	Transmissor indicador de vazão.....	28
3.4.4	Sistema de agitação	30
3.4.5	Sensor do nível de espuma	30
3.4.6	Analizador de pH	31
3.4.7	Controle de bioprocessos	32
3.4.7.1	Tipos de controles utilizados em bioprocessos	34
3.4.7.1.1	<i>Controle por realimentação</i>	34
3.4.7.1.2	<i>Controle por pré-alimentação</i>	35
3.4.7.1.3	<i>Controle inferencial</i>	35
3.4.8	Preparação de um biorreator.....	35
4	DESENVOLVIMENTO	38
4.1	Controle de pH	39
4.2	Controle de temperatura	44
4.3	Controle de agitação	47
4.4	Sistema de enchimento automático	48
4.5	Controle automático do nível de espuma.	50
4.6	Controle de pressão	51

4.7	Válvulas de bloqueio.....	52
4.8	Desenvolvimento do programa CLP e IHM	53
4.9	Resultado da pesquisa de campo.....	60
4.10	Custos relacionados a automação do biorreator.	61
4.11	Comparativo de preços.....	64
5	CONCLUSÃO	66
	REFERÊNCIAS.....	68

1 A PRODUÇÃO DE BIOINSUMOS

Segundo MEYER (*et al.*, 2022), com a crescente demanda por produção de alimentos em áreas cada vez mais limitadas e a busca por novas técnicas que substituam a utilização de fertilizantes químicos na agricultura, torna-se necessária a adoção de novas tecnologias de plantio para o cultivo. A utilização dos bioinsumos para adubação do solo contribui para o desenvolvimento das lavouras, visto que são compostos por microrganismos que desempenham um papel fundamental na regulação do solo, pois além de repor naturalmente os nutrientes necessários para o cultivo, eles também são utilizados no combate a pragas e doenças que prejudicam a lavoura.

Os bioinsumos abrangem uma diversidade de produtos, processos e tecnologias originados de fontes vegetais, animais ou microbianas. Seu propósito é promover interferências positivas nos sistemas de produção agropecuária, bem como nos sistemas aquáticos e florestais. Desempenham, assim, um papel fundamental ao interagir com os processos físico-químicos e biológicos, aprimorando as respostas de animais, plantas, microrganismos e substâncias derivadas (Conceitos, [s.d.]).

Na categoria dos bioinsumos, encontram-se os bioestimulantes, compostos por produtos que incorporam substâncias naturais com diferentes composições. Estes podem ser aplicados diretamente em plantas, sementes e solo, com o propósito de incrementar a produção, melhorar a qualidade das sementes e estimular o desenvolvimento radicular. Além disso, os bioestimulantes fomentam o equilíbrio hormonal das plantas, promovem uma germinação mais célere e uniforme e influenciam positivamente o crescimento vegetal, estimulando a divisão, diferenciação e alongamento celular (Conceitos, [s.d.]).

Outra vertente essencial dos bioinsumos é representada pelos biofertilizantes, que incorporam componentes ativos ou substâncias orgânicas provenientes de microrganismos ou de sua atividade. Tais produtos atuam de maneira direta ou indireta nas plantas cultivadas, incrementando sua produtividade e aprimorando sua qualidade. Os biofertilizantes desempenham um papel crucial ao promover a fertilidade do solo e ao prover os nutrientes essenciais para o desenvolvimento das plantas (Conceitos, [s.d.]).

Além disso, há também os inoculantes, produtos, processos ou tecnologias que incluem microrganismos benéficos para o crescimento das plantas. Esses microrganismos desempenham um papel central na fixação de nitrogênio, na disponibilização de nutrientes e na promoção da saúde das plantas, contribuindo, assim, para uma agricultura mais sustentável e eficiente (Conceitos, [s.d.]).

Por fim, os defensivos biológicos, também conhecidos como biopesticidas, são produtos de controle de pragas e doenças que consistem em agentes biológicos vivos, como microrganismos (por exemplo, bactérias, vírus, fungos), insetos benéficos (predadores ou parasitóides) e extratos de plantas. Eles não são produtos químicos sintéticos. Os biopesticidas são uma alternativa mais ecológica aos pesticidas químicos (Conceitos, [s.d.]).

Em síntese, os bioinsumos representam uma verdadeira revolução na agricultura, oferecendo soluções inovadoras e sustentáveis para ampliar a produção de alimentos de boa qualidade. São, sem dúvida, a chave para um futuro agrícola mais promissor, onde a produção se harmoniza com a preservação do meio ambiente e com a saúde humana.

O âmbito deste trabalho será dedicado a avaliar o desempenho da produção de bioinsumos em um biorreator automatizado com a utilização de um CLP. Esse biorreator é utilizado para produção de quatro diferentes tipos de bioinsumos com grande importância para a agricultura, sendo eles, os Inoculantes *Bradyrhizobium* e *Azospirillum*, bem como os bioinseticidas *Beauveria* e *Isaria*. Esses bioinsumos desempenham papéis fundamentais na prática agrícola, promovendo um sistema mais eficiente, sustentável e ecologicamente consciente.

Os Inoculantes *Bradyrhizobium* e *Azospirillum* têm um impacto significativo no desenvolvimento das culturas, especialmente das leguminosas. Eles são compostos por microrganismos benéficos que estabelecem uma relação simbiótica com as plantas, contribuindo para seu crescimento e nutrição. O *Bradyrhizobium*, por exemplo, é capaz de fixar o nitrogênio atmosférico nas raízes das leguminosas, fornecendo um suprimento vital de nitrogênio para o crescimento das plantas. Já o *Azospirillum* ajuda a melhorar a absorção de nutrientes, aumentando a eficiência do uso de fertilizantes e favorecendo plantas mais saudáveis e produtivas (Franchi, 2020).

1.1.1 Delimitação do Tema

Os bioinseticidas *Beaveria* e *Isaria* são cruciais no controle de pragas agrícolas, oferecendo uma alternativa mais sustentável aos inseticidas químicos convencionais. Eles contêm microrganismos que se dirigem especificamente a insetos prejudiciais, minimizando os impactos negativos ao meio ambiente e à saúde humana. A *Beaveria* e a *Isaria* atuam interrompendo o ciclo de vida de pragas como larvas de besouros e pulgões, reduzindo a necessidade de produtos químicos tóxicos e contribuindo para a preservação do ecossistema (Lorencetti *et al.*, 2018).

O foco do estudo será em avaliar o desempenho da automação na produção desses bioinsumos, uma abordagem que oferece vantagens significativas no que diz respeito à escalabilidade e eficiência de produção. Esse estudo é relevante, pois a produção eficaz desempenha um papel essencial em atender à crescente demanda por práticas agrícolas sustentáveis e seguras, especialmente em um contexto global onde a agricultura enfrenta desafios contínuos.

1.2 Problemas e Premissas

A produção dos bioinsumos requer um complexo processo de fabricação visto que os microrganismos se desenvolvem em ambientes controlados livre de agentes contaminantes presentes no ar. Para obter um produto de qualidade, grandezas como temperatura, pressão, pH, oxigênio dissolvido, aeração e agitação devem ser monitorados durante toda a cadeia produtiva. Isso assegura o controle e a manutenção de condições favoráveis para o desenvolvimento dos microrganismos. Entretanto, o alto custo dos biorreatores automatizados oferecidos no mercado, inviabiliza sua aquisição por grande parte das empresas que fabricam os insumos biológicos. Como alternativa, os bioinsumos são fabricados em biorreatores cuja operação é de forma manual, desse modo a produção fica suscetível a erros operacionais. Além disso, estes equipamentos não contam com um controle preciso das principais variáveis, que são fundamentais para o desenvolvimento dos microrganismos. Como consequência, a qualidade do produto e a capacidade produtiva dessas empresas são afetadas.

Sendo assim, a automação de biorreatores manuais dedicados à produção de bioinsumos a um custo acessível representa uma estratégia promissora para impulsionar a produtividade e a competitividade das empresas nesse segmento. Esse avanço tecnológico envolve a adoção de um conjunto de componentes, incluindo um controlador lógico programável e uma interface homem-máquina, em conjunto com

sensores disponíveis no mercado, tais como sensores de temperatura, pressão, vazão e analisadores de pH e oxigênio dissolvido. Ademais, um inversor de frequência é utilizado para regulamentar a velocidade de agitação do processo.

Outro elemento fundamental dessa automação é a inclusão de bombas peristálticas, que desempenham um papel crucial na adição de soluções para o controle do pH e na aplicação de antiespumante. Elas também garantem a inoculação asséptica do meio, mantendo a integridade dos processos biológicos. Para manter a estabilidade das reações bioquímicas, o sistema implementa um controle automático de pH.

A gestão eficaz da aeração e da agitação é de suma importância para manter um ambiente de oxigenação ideal para o crescimento dos microrganismos. Além disso, o sistema monitora e regula a temperatura de forma precisa, garantindo a estabilidade durante o processo metabólico dos microrganismos.

A automação também engloba o controle da pressão do processo, garantindo a segurança operacional e prevenindo possíveis contaminações. O sistema executa automaticamente etapas cruciais, como enchimento, esterilização e resfriamento, contribuindo significativamente para a preparação do produto.

Um dos destaques desse sistema de controle é a sua interface intuitiva, que permite o acesso remoto. Isso proporciona aos operadores o controle completo sobre todas as variáveis do processo, além de permitir o monitoramento de alarmes, diagnósticos e a calibração de sensores e analisadores. Além disso, os operadores têm a capacidade de analisar e exportar gráficos das principais variáveis do processo, fornecendo informações valiosas para otimização contínua e tomada de decisões informadas.

Nesse sentido, o presente trabalho pretende verificar quais são as vantagens decorrentes da automação de um biorreator manual, com a utilização de CLP's, para produção de bioinsumos.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Realizar uma avaliação detalhada do desempenho dos processos operacionais em um biorreator automatizado que emprega Controladores Lógicos Programáveis (CLPs,

2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos desta pesquisa visam aprofundar o entendimento sobre os insumos biológicos e biorreatores, analisando os impactos da automatização de biorreatores manuais e comparando os custos envolvidos na implementação da automação com a aquisição de biorreatores automatizados disponíveis no mercado. Esses objetivos específicos serão abordados de forma sistemática ao longo da pesquisa, proporcionando uma visão abrangente sobre a importância dos insumos biológicos, dos biorreatores e dos benefícios da automação na indústria biotecnológica.

2.3 Justificativa

A discussão sobre a automação de biorreatores manuais para produção de insumos biológicos se justifica pela crescente demanda por esses produtos. Isso se deve ao fato de que o agronegócio desempenha um papel fundamental na economia global nos dias de hoje. Contudo, o uso indevido de agrotóxicos tem sido uma problemática crescente nos últimos anos pois eles são usados excessivamente na agricultura, com consequências diretas e indiretas para a saúde pública e o meio ambiente. O uso desses produtos tem sido associado ao aumento de problemas de saúde, como câncer, problemas respiratórios, alergias, infertilidade, entre outros. Além disso, o uso de agrotóxicos pode provocar danos ambientais irreversíveis, como contaminação de solos, águas e ar, redução da biodiversidade, extinção de espécies e acidificação dos mares. Neste contexto, a substituição dos agrotóxicos por insumos biológicos pode ser uma solução para a redução dos riscos à saúde e ao meio ambiente (MEYER *et al.* 2022).

O uso de insumos biológicos é considerado mais saudável e eficaz para o controle de pragas. Além disso, a adoção de insumos biológicos pode contribuir para

o aumento da qualidade e produtividade das frutas, verduras e grãos produzidos por meio da agricultura orgânica, ao mesmo tempo em que reduz os custos de produção (SOUZA *et al.* 2022).

A agricultura de precisão, que se baseia na utilização de insumos biológicos, tem sido fundamental para o sucesso do setor. A demanda por bioinsumos tem crescido nos últimos anos, principalmente devido à expansão da agricultura de precisão. Os insumos biológicos têm um impacto significativo sobre a qualidade e quantidade dos produtos agrícolas finais, além de contribuir diretamente para o desenvolvimento socioeconômico e ambiental (VIDAL, 2021).

De acordo com MARCHESAN (2018), os biorreatores automatizados são dispositivos utilizados na obtenção de produtos biotecnológicos, eles são altamente eficientes e úteis, pois permitem a produção em larga escala dos bioinsumos. Entretanto, por possuírem uma tecnologia complexa e atenderem a uma gama de outros processos biotecnológicos, o custo dos biorreatores tem sido uma preocupação contínua para muitas empresas desse setor, pois eles são um investimento significativo, inviabilizando sua aquisição. Desse modo, os produtores de bioinsumos optam por biorreatores manuais, porém esses equipamentos não possuem a instrumentação necessária para fabricação desse tipo de produto o que ocasiona baixo rendimento na produção e acarreta prejuízos para a empresa.

2.4 Metodologia

Este estudo é uma pesquisa aplicada de natureza descritiva e exploratória, com o objetivo de detalhar o processo de automação de um biorreator manual utilizado na produção de bioinsumos. Além disso, busca-se apresentar os resultados alcançados por meio da tecnologia implementada. Nesse sentido os resultados serão apresentados de forma qualitativa e quantitativa, a partir da coleta de informações de fontes primárias e secundárias. De acordo com BERNARDINO (2019) os dados obtidos de origem exclusiva pela primeira vez por um pesquisador ou investigador, classificam-se como dados primários. Em contrapartida, quando os dados são adquiridos a partir de fontes já existentes, eles são categorizados como dados secundários.

A planificação da pesquisa inclui, em primeiro lugar, o levantamento dos dados secundários, entre eles uma revisão bibliográfica sobre bioprocessos, utilizado

como obra principal o livro *Biotecnologia Industrial Volume 2*, do autor Willibaldo Schmidell, para posterior contato com as fontes primárias, a fim de promover a coleta de dados em campo. Os dados primários serão obtidos por meio do estudo de caso de um projeto de automação de um biorreator manual realizado na cidade de Katueté, localizada no Paraguai.

A fim de definir o conceito de bioinsumos, é crucial realizar uma análise minuciosa da definição de insumos biológicos, englobando a identificação dos diversos tipos utilizados em processos biotecnológicos, a compreensão de sua relevância no cultivo de microrganismos ou células e a avaliação das características que os tornam essenciais para a produção de produtos biotecnológicos. Paralelamente, no que concerne ao conceito de biorreatores, é imprescindível aprofundar a compreensão. Isso implica definição precisa de biorreator, na exploração dos diferentes tipos disponíveis e na obtenção de uma compreensão abrangente de suas funções e aplicações nos processos biotecnológicos.

Os instrumentos de pesquisa utilizados serão aplicados de maneira planejada aos técnicos responsáveis pela operação do biorreator, com o objetivo de identificar as principais mudanças operacionais e na qualidade do produto obtidas após a automatização realizada. Um questionário contendo seis perguntas sobre a eficiência do equipamento e uma entrevista estruturada com base em um roteiro contendo questões específicas do desempenho do processo.

No que tange à descrição do projeto de automação, será apresentado o processo de desenvolvimento de forma abrangente. Isso compreende a minuciosa exposição dos componentes, sensores, atuadores e software envolvidos na automação, além da discussão dos desafios e das considerações práticas inerentes a esse desenvolvimento. Com o propósito de avaliar a eficácia do sistema implementado, será conduzida uma análise para entender como a automação afeta a eficiência operacional dos biorreatores manuais. Essa análise englobará a melhoria da produtividade, a redução dos custos operacionais e o aumento da qualidade do produto final alcançado por meio da automação.

Na esfera da análise financeira, será realizada uma comparação entre os custos relacionados à implementação da automação em um biorreator manual e a aquisição de um biorreator automatizado disponível no mercado. Isso implicará uma análise dos custos, bem como das vantagens e desvantagens de cada abordagem.

Para proporcionar uma análise abrangente dos dados coletados, será aplicada uma metodologia que combinará análise quantitativa e qualitativa. A análise quantitativa mensura aspectos como eficiência produtiva, tempo de produção, qualidade do produto final, variabilidade dos lotes de produção, custos operacionais, segurança do trabalho e eficácia do monitoramento em tempo real. Por outro lado, a análise qualitativa envolverá a interpretação e categorização das respostas, buscando entender os significados, percepções e experiências dos participantes em relação a esses aspectos.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

A biotecnologia, como campo multidisciplinar, tem desempenhado um papel crucial no desenvolvimento de soluções inovadoras para desafios contemporâneos nas áreas de agricultura, saúde, meio ambiente e indústria. Nesse contexto, os bioinsumos e os biorreatores surgem como elementos fundamentais, impulsionando avanços significativos na produção agrícola e no processamento de produtos biotecnológicos para diversos fins. Este referencial teórico busca explorar os conceitos fundamentais relacionados a bioinsumos, biorreatores, sistemas e instrumentos de controle, com base nas contribuições de diferentes autores. Por meio dessa análise, pretende-se obter uma compreensão abrangente das ferramentas e tecnologias essenciais que impulsionam a biotecnologia moderna, destacando sua importância e potencial impacto em diferentes setores industriais e ambientais.

3.1 Bioinsumos

A agricultura sustentável é uma forma de produção de alimentos que promove ações que protegem o meio ambiente, a saúde animal e humana e que utiliza insumos que não agridem o ecossistema. Para isso, faz-se uso de diversas técnicas, como a redução de pesticidas sintéticos, rotação de culturas, plantio direto, culturas de cobertura e a utilização de bioinsumos. Estas ações têm aumentado fortemente nos últimos anos tanto no Brasil como no mundo. Para Batalha (2021), os bioinsumos são elementos orgânicos, da própria natureza, que são usados na agricultura para promover a fertilidade do solo e crescimento saudável das plantas. Isso inclui bactérias que fixam nitrogênio, substâncias minerais para a remineralização do solo, organismos biológicos para o controle de pragas e doenças, e plantas de cobertura para proteger e nutrir o solo.

Corroborando com Batalha, Souza (2022) define que os bioinsumos, também conhecidos como insumos biológicos, são produtos, processos ou tecnologias que ajudam o crescimento e desenvolvimento de animais, plantas e microrganismos, melhorando a resposta destes às substâncias químicas e biológicas.

A utilização de bioinsumos ajuda a reduzir a dependência de insumos químicos e tem impacto positivo na saúde do meio ambiente. Esta prática é conhecida como agricultura regenerativa. Segundo Meyer (2022), a agricultura regenerativa vem sendo usada como alternativa às práticas convencionais de produção agrícola, pois

utiliza tecnologias que aumentam a produtividade, além de preservar o meio ambiente, economizar o uso de água e reduzir o uso de produtos químicos. Os sistemas de cultivo não são isolados, mas integrados em processos dinâmicos e interdependentes. O autor ainda destaca que a utilização de bioinsumos é uma das principais ferramentas para obter um alto rendimento na produção agrícola.

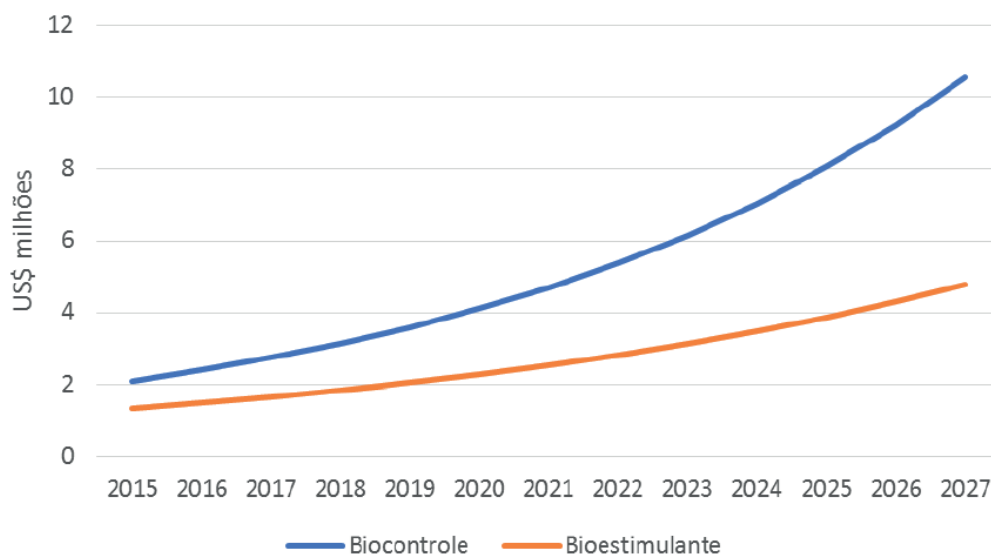
Os bioinsumos estão presentes em toda cadeia da produção agrícola e agropecuária. Entre eles estão os vírus, bactérias, fungos, parasitóides, ácaros predadores, feromônios, probióticos, suplementos para rações, bioprodutos para controle de doenças e pastagens, biofilmes a base de produtos naturais, aditivos e outros insumos que interagem com a microbiota (VIDAL et al. 2021).

Trata-se de uma categoria ampla de insumos, que envolve uma miríade de possíveis soluções, cujos principais representantes são os produtos relacionados à nutrição vegetal, como inoculantes e biofertilizantes, ao estímulo, como os bioestimulantes, e ao controle de pragas, doenças e plantas daninhas, como os produtos biológicos de controle, ou defensivos biológicos, incluindo os semioquímicos (MEYER, 2022, p. 39).

No Brasil e no mundo, o uso desses insumos tende a aumentar, devido a fatores como regulação e mercado. O valor do mercado mundial de biológicos para agricultura para 2020 foi de US\$9,9 bilhões e os produtos usados para controle representam US\$5,2 bilhões desse montante. A previsão é que esse mercado continue crescendo, atingindo US\$10 bilhões para biodefensivos e US\$3 bilhões para bioestimulantes (IHS Markit,2021) apud (MEYER, 2022).

A Figura 1 apresenta uma estimativa de crescimento na produção de bioinsumos para os próximos anos.

Figura 1: Estimativa de crescimento global dos produtos biológicos de controle e bioestimulantes.



Fonte: Dunham Trimmer (2021)

Nesse sentido pode se afirmar a necessidade de aumento na capacidade produtiva em escala industrial de bioinsumos para os próximos anos, entretanto por se tratar de um bioproduto, esse exige um complexo processo de fabricação. O monitoramento e controle são importantes para que esses processos sejam bem-sucedidos, pois os microrganismos mudam suas características metabólicas ao longo do processo. Desta forma, para obter um bom resultado, é importante observar e controlar a interação entre esses microrganismos e o ambiente em que são cultivados (VITOLLO, 2015). Nesse sentido, os processos biotecnológicos necessitam ser realizados em um biorreator.

3.2 Biorreatores

Os biorreatores são sistemas fechados usados para cultivar os microrganismos em condições controladas. Eles possuem sensores e sistemas de monitoramento que ajustam o ambiente para tornar o processo o mais produtivo possível. Podem ser usados em escala de laboratório, piloto ou industrial (BENZ, 2011).

De acordo com SCHMIDELL (2021), os biorreatores são sistemas para realizar algum processo biológico, por meio de equipamentos complexos que ajudam a controlar variáveis como temperatura, pH e oxigênio dissolvido, permitindo a homogeneização do meio com células. Segundo MOLINO (2003) são dispositivos

usados há muito tempo para a realização de processos biológicos, como a produção de bebidas alcoólicas como cerveja e vinho. Já Marchesan (2018), diz que biorreatores são dispositivos utilizados para realizar processos bioquímicos, como reações catalisadas por enzimas, fermentações e outros. No qual se utilizam organismos vivos, permitindo que as reações ocorram de forma segura.

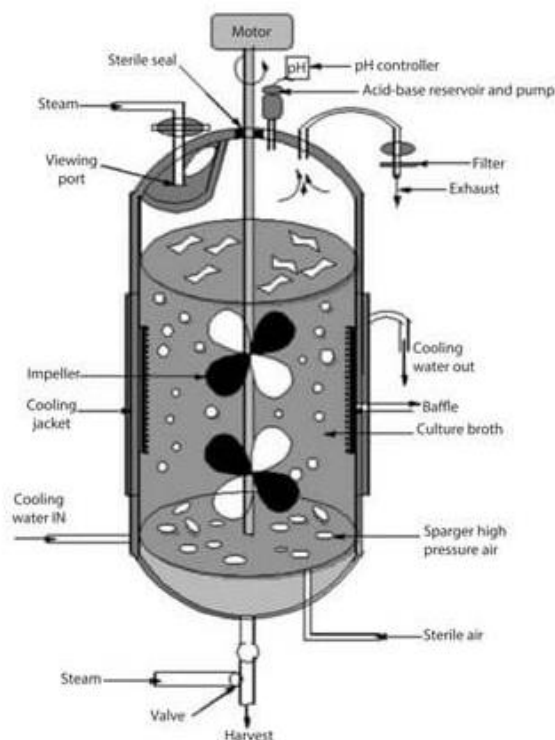
Existem diversos tipos de biorreatores, porém o foco de estudo deste trabalho será em biorreatores em fase aquosa de células livres agitados mecanicamente e aerado.

Um biorreator é um tanque cilíndrico feito com aço inox, aço carbono ou vidro, onde usamos um motor acoplado a um eixo central para agitar o meio de cultura. Para manter a assepsia interna do equipamento, utiliza-se selos mecânicos ou magnéticos. A proporção entre altura e diâmetro do tanque depende do tamanho e para reatores industriais é de 3 a 5 para 1 e para reatores de bancada é de 1 a 2 para 1. Se usa chicanas (baffles) verticais na parede para evitar vórtices e melhorar a mistura. Os tipos de impelidores mais comuns são turbinas Rushton ou discos de pás planas (flat blade) para operação com microrganismos que precisam de oxigenação, e hélices marinhas para culturas sensíveis (SCHMIDELL et al., 2021).

Para melhorar o desempenho de um bioprocessos, BRUNO (2023) afirma que é necessário controlar as condições ambientais no interior do reator, como temperatura, pH, velocidade de agitação, vazão de ar, concentração de oxigênio dissolvido, pressão, nível de líquido, detecção de espuma, concentração de oxigênio e de dióxido de carbono nos gases de exaustão. Isso se faz com instrumentação adequada ao processo para obter os dados, que são chamados variáveis secundárias, em tempo real. Variáveis como o pH, a concentração de oxigênio na fase líquida e os gases de exaustão podem nos ajudar a entender o metabolismo das células. Outras variáveis também podem ser medidas para obter maior precisão na estimativa do metabolismo celular (SCHMIDELL et al., 2021).

A Figura 2 apresenta as partes de um biorreator e suas funções.

Figura 2: Esquemático de um biorreator



Fonte: (MAGAR, 2024, p.9)

Segundo Benz (2011) um biorreator automatizado usa um controlador dedicado para medir variáveis como temperatura, pH, OD, vazão de ar, pressão, velocidade de agitação, concentração de oxigênio e dióxido de carbono. Estas informações são enviadas para um sistema de supervisão industrial que permite controlar variáveis como vazão de ar, velocidade de agitação, bombas peristálticas para adição de ácidos, bases e meio suplementar. Assim, ele permite a execução de diversas estratégias de controle.

De acordo com BIECHELE (et al., 2015), os sensores fornecem informações sobre a qualidade e quantidade dos processos biotecnológicos. Eles precisam ser esterilizados dentro dos biorreatores para que se assegure a ausência de contaminação. Devem medir parâmetros como temperatura, pH, oxigênio dissolvido, dióxido de carbono e pressão. São essenciais para o controle das condições necessárias para um processo biotecnológico bem-sucedido.

Em um biorreator, diversas variáveis são monitoradas para garantir o sucesso do cultivo. As variáveis físicas, como vazão de gases, temperatura e pressão, são controladas para criar um ambiente propício ao crescimento. Os parâmetros físico-químicos, como pH, potencial de oxirredução e concentração de substâncias

químicas, são avaliados para entender as condições do meio. Além disso, parâmetros biológicos, como morfologia celular, concentração de biomassa e viabilidade, são analisados para acompanhar o desenvolvimento do microrganismo. O monitoramento cuidadoso dessas variáveis é essencial para o sucesso de processos biotecnológicos e de bioprodução. Estes grupos de variáveis ajudam a descrever o ambiente e o estado dos bioprocessos.

A Figura 3 apresenta um biorreator comercial automatizado para escala industrial.

Figura 3: Biorreator automatizado



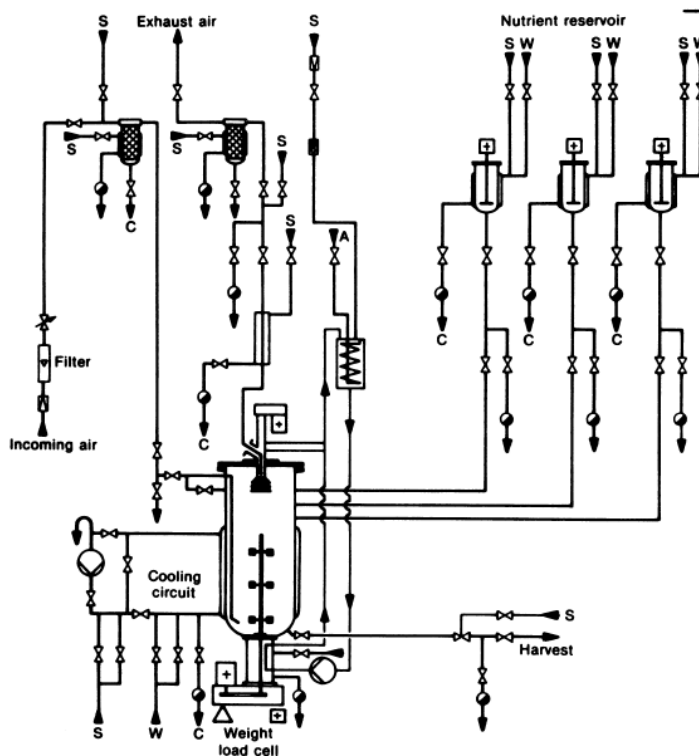
Fonte: ENGCO (2024)

3.3 Requisitos mínimos para produção de bioinsumos

Um reator usado em bioprocessos deve proporcionar as condições adequadas para crescimento de microrganismos, para isso ele precisa satisfazer alguns requisitos mínimos. De acordo com SCHMIDELL (*et al.* 2021), o reator precisa se manter estéril e trabalhar sem a necessidade de manutenção por muitos dias, obedecer a todas as exigências ambientais e ter potência absorvida mínima. Controlar a temperatura, aeração, pH e manter o meio estável e homogêneo são essenciais. O reator também precisa ter superfícies internas polidas e dispositivos para retirada de amostras sem serem contaminadas e um tamanho adequado para o processo desenvolvido. O modelo de tanque cilíndrico vertical se destaca entre os reatores, já que possui sistema de aquecimento e resfriamento por serpentina ou camisa.

A Figura 4 apresenta um biorreator em recorte além de seus instrumentos de processo

Figura 4: visão geral de um biorreator automatizado



Fonte: Engineering bioprocess (2002, p.289)

A Fotografia 1 apresenta um reator manual em escala industrial utilizado para produção de bioinsumos. Esse biorreator não oferece todos os recursos necessários para se obter microrganismos em sua máxima concentração.

Fotografia 1: Reator químico

Fonte: Autoria própria (2022)

3.4 Controle e instrumentos para um bioprocesso

3.4.1 Sensor de temperatura

Os microrganismos necessitam de temperaturas específicas para se desenvolver e multiplicar, por isso, o bioprocesso deve possuir um controle da temperatura eficiente de modo a garantir a qualidade do produto final. Além disso, os sensores de temperatura também têm um papel importante para assegurar a esterilização do biorreator nos processos industriais (BIECHELE, 2015).

As termorresistências do tipo Pt-100 são as mais usadas na indústria de bioprocessos por serem muito estáveis e terem uma grande faixa de temperaturas na qual funcionam. O seu uso é importante para medir temperaturas de 0 a 150 graus e manter uma leitura de temperatura repetível, confiável e que responda rapidamente às mudanças de temperatura SCHMIDELL (*et al.* 2021). Eles possuem um fio metálico dentro de um cilindro, e assim que a corrente elétrica passa por ele, varia a tensão segundo a temperatura. Nas termorresistências, a resistência se altera linearmente com a temperatura, com o elemento sensor sendo de platina de alta pureza (FRANCHI, 2015). Esses termômetros baseados em resistência são instrumentos de medição de temperatura mais precisos do que os termopares. Eles não precisam de

calibragem periódica para funcionar adequadamente, o que economiza tempo e dinheiro. Por outro lado, eles têm uma faixa de medição mais estreita (BIECHELE et al., 2015).

A Fotografia 2 apresenta um sensor de temperatura sanitário do tipo PT-100, utilizado em bioprocessos.

Fotografia 2: Sensor de temperatura



Fonte: Autoria própria (2023)

3.4.2 Sensor de pressão

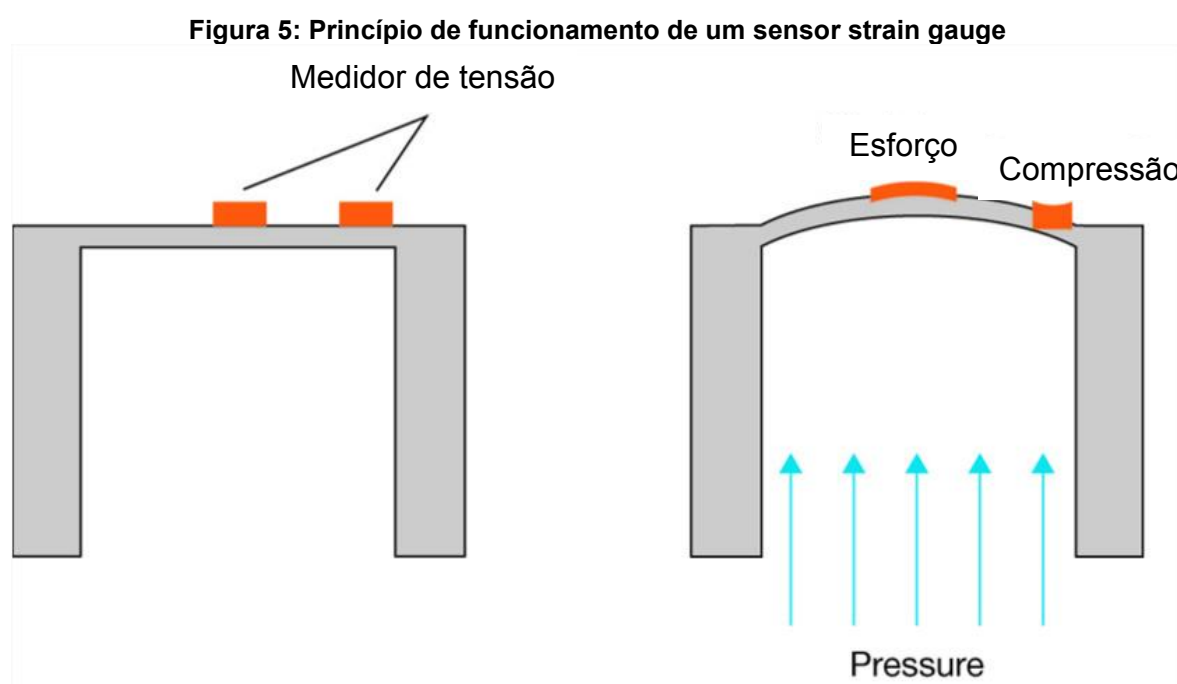
A pressão no biorreator tem consequências diretas na solubilidade de gases, portanto precisa ser ajustada durante o cultivo. Manter uma pressão reduz a possibilidade de contaminações além disso, na etapa de esterilização, é importante monitorar esse parâmetro para garantir a segurança das pessoas e a integridade do equipamento (SCHMIDELL *et al.*, 2021).

Para medir a pressão interna dos biorreatores, alguns dos sensores utilizados são do tipo piezoelétricos. De acordo com FRANCHI (2015), o princípio de medida consiste na quantificação da deformação de um corpo sólido quando submetido a pressão, resultando em uma relação direta entre a deformação mecânica e o sinal elétrico. Para isso, são utilizados transdutores de pressão que consistem em elementos como células de carga, elementos metálicos e semicondutores. Estes elementos mudam a resistência elétrica quando a pressão é aplicada.

Outra opção seria o transdutor de pressão capacitivo que consiste de duas placas separadas por uma membrana ou elemento sensor. A pressão, que deve ser medida, é aplicada neste elemento que fica imerso em óleo. Quando a pressão muda, o elemento se deforma e isso altera a capacitância entre as placas, gerando uma corrente ou tensão elétrica proporcional à pressão (FRANCHI, 2015).

Há ainda os extensômetros elétricos, um sensor de pressão que opera com base na mudança da resistência elétrica de um dispositivo flexível, conhecido como “strain gauge”, que é colocado na superfície de um objeto para medir sua deformação sob a ação da pressão. A partir dessa mudança de resistência, é possível obter um sinal elétrico proporcional à pressão aplicada (FRANCHI, 2015).

A Figura 5 ilustra o princípio de funcionamento de um sensor strain gauge, muito utilizado em sensores de pressão.



Fonte: (GRENN, 2024, p.1)

A Fotografia 3 apresenta um sensor de pressão com selo sanitário com conexão tri-clamp. Esse tipo de conexão permite a fácil desmontagem do equipamento para realizar a limpeza e desinfecção do mesmo. Os sensores de pressão utilizados em bioprocessos devem suportar temperaturas acima de 120°C, por esse motivo, muitos desses sensores possuem na sua estrutura um radiador para dissipar o calor e evitar que seus componentes eletrônicos sejam danificados.

Fotografia 3: Sensor de pressão sanitário

Fonte: Aatoria própria (2023)

3.4.3 Transmissor indicador de vazão

Para SCHMIDELL (*et al.* 2021) as medidas de vazão são necessárias para a quantificação de gases, que são fornecidos ao biorreator. Elas também servem para controlar o oxigênio nos cultivos aeróbicos. Outro uso comum é para medir a quantidade de oxigênio consumido e dióxido de carbono produzido em bioprocessos aeróbicos, baseando-se nessas medições para realizar cálculos que estimam o crescimento celular. Para quantificar a vazão de um fluido é necessário dispositivos, como rotâmetros, medidores de vazão mássica e placas de orifício. A forma de escolher qual dispositivo usar depende da natureza do fluido, e se é preciso monitorá-lo constantemente. Neste trabalho faremos uma breve abordagem dos instrumentos mais usados para controle de vazão em bioprocessos, o rotâmetro e medidor de vazão tipo turbina.

Os medidores de vazão tipo turbina de área variável medem a quantidade de fluido que escoar através do tubo. O tubo possui um flutuador com peso constante que se move de acordo com o aumento da vazão, por isso, a posição do flutuador é proporcional a vazão e pode ser convertida em um sinal elétrico para fornecer uma indicação precisa da vazão (Blasters, 2022).

A Figura 6 apresenta um Medidor de vazão do tipo rotâmetro BL, muito utilizado para verificar o volume de ar que está entrando no biorreator.

Figura 6: Rotâmetro

Fonte: (BLASTER, 2024)

Já os medidores de vazão tipo turbina são equipamentos usados para mensurar a velocidade média de um fluido. Ele é composto por um corpo cilíndrico que contém uma turbina. O corpo possui uma entrada e uma saída por onde o fluido passa, e a turbina é um rotor que possui várias pás ou palhetas em sua estrutura. Quando o fluido atravessa o medidor, ele faz com que a turbina gire. Um sensor magnético ou óptico detecta as rotações da turbina à medida que ela gira, o sensor então envia sinais elétricos ao sistema de medição, que registra o número de rotações da turbina. Estes aparelhos são precisos, porém, não podem ser usados com soluções que contenham sólidos suspensos (SCHMIDELL *et al.*, 2021). Em comparação com alguns outros tipos de medidores de vazão, os medidores tipo turbina muitas vezes têm um custo competitivo, tornando-os uma escolha econômica para muitas aplicações como no caso desse projeto.

A Fotografia 4 apresenta um medidor de vazão do tipo turbina, sua vantagem em relação a outros modelos de medidores de vazão existentes, está relacionado ao seu custo.

Fotografia 4: Medidor de vazão

Fonte: A autoria própria (2023)

3.4.4 Sistema de agitação

O controle de agitação é muito importante no processo é utilizado para misturar e aquecer corretamente um meio reacional, durante toda a etapa, pois ajuda a manter a temperatura e a quantidade de oxigênio dissolvido necessário para contribuir com os processos biológicos a serem realizados. O controle é realizado com utilização de inversores de frequência para motores de corrente alternada e drivers quando se utiliza servomotores na agitação. Quanto maior for o biorreator, menor será a velocidade de agitação. No entanto, a velocidade na extremidade do impelidor permanece constante. Isso devido a velocidade tangencial que deverá ser a mesma para um mesmo bioprocessos, porém em escalas diferentes (SCHMIDELL *et al.*, 2021).

3.4.5 Sensor do nível de espuma

A formação de espuma durante a realização de cultivos é causada pela agitação e pela aeração do meio reacional, os nutrientes que estão sendo utilizados também influenciam na sua formação. Essa camada prejudica as reações físico-químicas do processo além de causar o entupimento da exaustão. Por isso é necessário utilizar um sistema que minimize ou elimine a formação de espuma nos

bioprocessos. Para evitar esse inconveniente o método mais utilizado é a adição de agentes químicos, os antiespumantes (SCHMIDELL *et al.*, 2021).

Os sistemas para detecção e controle da formação de espuma funcionam com um eletrodo ligado ao biorreator. Quando a espuma se forma no biorreator, ela fecha o circuito entre o eletrodo e a parede. Isso aciona uma bomba que adiciona o antiespumante. Quando a espuma diminui, o circuito é interrompido e desarmado (VITOLLO, 2015).

3.4.6 Analisador de pH

De acordo com SCHMIDELL (et al. 2021), o controle de pH é uma parte crucial no gerenciamento de bioprocessos, pois muitos microrganismos e culturas celulares têm requisitos específicos de pH para um crescimento adequado e produção de metabólitos desejados.

O pH é uma medida para avaliar a acidez ou alcalinidade de um líquido. Ela é realizada com a ajuda de eletrodos especiais chamados sensores potenciométricos. Esses sensores medem a diferença de potencial entre o líquido e uma superfície feita com vidro especial e essa diferença está relacionada à concentração de íons de hidrogênio no líquido (Duarte, 2022).

Ainda de acordo com Duarte (2022), a equação de Nernst é uma equação fundamental na eletroquímica que descreve a relação entre o potencial elétrico gerado por um eletrodo e a concentração de íons na solução. No caso de um eletrodo de pH, a equação de Nernst relaciona o potencial do eletrodo (E) com a concentração de íons de hidrogênio (a_{H^+}).

Equação de Nernst para eletrodo de pH.

$$E = E_0 + \left(\frac{R \times T}{F} \right) \times \ln(a_{H^+})$$

E = Potencial elétrico

E_0 = Potencial de referência

R = Constante dos gases ideais (8,314 J/(mol·K))

T = Temperatura absoluta

F = Constante de Faraday (96.485 C/mol)

a_{H^+} = Concentração de íons de hidrogênio

O pH é influenciado pela temperatura, por isso os eletrodos são combinados com sensores de temperatura para compensar o pH das medidas. Isso garante informações importantes sobre o processo analisado (SCHMIDELL *et al.*,2022).

A Fotografia 5 apresenta um eletrodo de pH utilizado em bioprocessos.

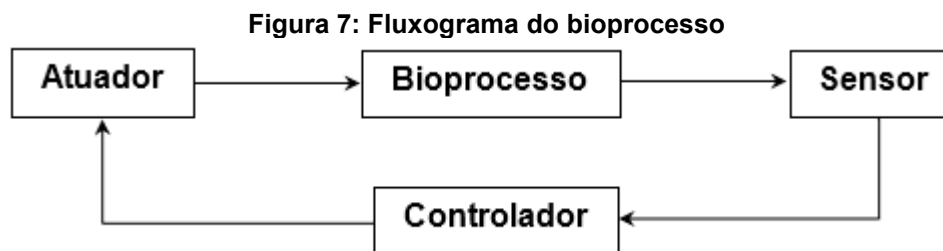
Fotografia 5: Eletrodo de pH



Fonte: A autoria própria (2023)

3.4.7 Controle de bioprocessos

Um processo controlado é basicamente a união de quatro elementos: o processo, os sensores (que medem propriedades químicas e bioquímicas do processo), os atuadores (que alteram a condição de funcionamento do processo) e o controlador (que comanda a mudança dos atuadores) conforme ilustra a Figura 7. O objetivo de controle deve ser determinado antes de estabelecer uma lei de controle que será executada por um algoritmo. Todos esses elementos juntos, formam um sistema de controle que pode ser aplicado a qualquer processo químico ou bioprocessos (SCHMIDELL *et al.*,2022).



Fonte: Autoria própria (2023)

Os bioprocessos são mais complexos que os processos químicos, pois envolvem várias reações bioquímicas em movimento e processos de transporte. Por se tratar de microrganismos, medir parâmetros fisiológicos e bioquímicos são difíceis, pois eles têm mecanismos de regulação próprios. Ao fazer um bioprocesso, tentamos manipular o ambiente externo para que afete positivamente o que acontece dentro das células. Para que isso ocorra, é necessário que se tenha o pleno controle das variáveis de entrada (BIECHELE, 2015).

Variáveis de controle são aquelas que devem ser monitoradas e controladas constantemente durante o processo para garantir que as condições sejam otimizadas e mantidas dentro dos limites especificados. Essas variáveis incluem temperatura, pressão, velocidade de agitação e pH. Segundo SCHMIDELL (*et al.*, 2022), elas podem ser divididas em dois grupos:

Variáveis de entrada – são as grandezas ou condições que podem ser ajustadas ou controladas para influenciar o comportamento e o resultado do processo. Como vazão do ar, velocidade de agitação, vazão da água quente ou fria para controle de temperatura, quantidade de solução ácida ou alcalina para controle do pH e pressão.

Variáveis de saída – são as grandezas ou propriedades que são medidas ou obtidas como resultado do processo. Como a temperatura do processo, oxigênio dissolvido, pH, pressão e nível de dióxido de carbono. A pressão é uma variável que pode ser usada como uma entrada ou saída. Por exemplo, se existir uma válvula de controle, o controlador pode ajustar a abertura da válvula, fazendo com que a pressão seja usada como entrada. Se não houver uma válvula de controle, então a pressão é uma saída (SCHMIDELL *et al.*, 2022).

As variáveis de entrada podem ser classificadas como variáveis manipuladas ou perturbações. As variáveis manipuladas podem ser ajustadas livremente pelo

operador ou pelo controle do sistema. Já as perturbações não estão sob controle do operador ou sistema (SCHMIDELL *et al.*, 2022).

As variáveis de saída são classificadas em variáveis medidas, quando seus valores são identificados por medição direta, e variáveis não medidas, quando seus valores não podem ser identificados diretamente (SCHMIDELL *et al.*, 2022).

3.4.7.1 Tipos de controles utilizados em bioprocessos

Nos bioprocessos são utilizados basicamente três tipos de arquiteturas de controle: Controle por realimentação, controle por pré-alimentação e controle inferencial (SCHMIDELL *et al.*, 2022).

3.4.7.1.1 *Controle por realimentação*

No controle por realimentação, um sensor mede uma variável no sistema, transferindo seu valor para um sistema de controle. O controlador compara esse valor à quantidade desejada (set-point). Dependendo da comparação, o controlador ajusta a variável de entrada para que o valor medido se mantenha no set-point esperado. De acordo com FRANCHI (2015), é uma técnica simples que ajuda a manter a variável controlada em um valor desejado, mesmo com perturbações. Quando esta desvia do seu set-point, o controlador regula sua saída para trazê-la de volta ao valor desejado, sem precisar conhecer as perturbações. Assim, a variável controlada é mantida constante independentemente das perturbações.

A desvantagem desse sistema é que ele só consegue compensar uma perturbação depois que ela já ocasionou uma alteração na variável controlada. Em outras palavras, a mudança na variável deve ser propagada por todo o processo antes que o sistema consiga corrigi-la (FRANCHI, 2015).

Nos bioprocessos, o controle por realimentação regulatório em malha fechada é uma técnica para controlar as principais variáveis do processo, como temperatura, pressão, pH e oxigênio dissolvido (OD). Geralmente, são usadas malhas de controle com uma única entrada e saída, chamadas malhas SISO (single input single output), usando controladores PID ou liga-desliga (SCHMIDELL *et al.*, 2022).

PID é o nome do algoritmo de controle muito usado em processos químicos, que significa: proporcional, integral e derivativo. Ele mede a diferença entre o valor desejado (Set-Point - SP) e o que foi medido (Variável de Processo - PV). Essa

diferença é chamada erro (ε). O PID manipula a variável (m) para correção deste erro, usando três parâmetros: ganho proporcional (K_p), ganho integral ($1/T_i$) e ganho derivativo (T_d) (FRANCHI, 2015).

$$m = K_p \times \varepsilon + \frac{1}{T_i} \times \int_0^t \varepsilon \times dt + T_d \times \frac{d\varepsilon}{dt} \quad (1.2)$$

O controlador on-off é um tipo especial de controle, que é usado para ligar ou desligar algum equipamento, sem sinais intermediários. Para isso, é usado um elemento final de controle, que pode ser uma válvula solenóide, uma bomba de vazão fixa ou uma resistência de aquecimento de potência fixa. Estes são responsáveis por limitar a ação do controle (FRANCHI, 2015).

3.4.7.1.2 Controle por pré-alimentação

A configuração de controle por pré-alimentação é um meio de controlar uma variável a fim de evitar efeitos indesejáveis. É uma forma de agir antes mesmo que a perturbação cause um problema, pois mede diretamente o efeito dessa perturbação e aplica uma ação de controle para neutralizar os possíveis efeitos antes que eles aconteçam (SCHMIDELL *et al.*, 2022).

3.4.7.1.3 Controle inferencial

O controle inferencial é uma técnica utilizada para manter o equilíbrio de variáveis controladas num processo. Ela usa medidas secundárias, que são valores das saídas medidas e um modelo matemático, para estimar os valores das variáveis controladas não medidas. Depois, o controlador ajusta as variáveis manipuladas com base nas estimativas calculadas (SCHMIDELL *et al.*, 2022).

3.4.8 Preparação de um biorreator

No processo de preparação de um biorreator industrial, uma série de etapas cruciais é seguida para garantir que o sistema esteja pronto para o cultivo de microrganismos ou células em larga escala. Inicialmente, realiza-se uma inspeção minuciosa para verificar a integridade das partes do biorreator, como agitadores, sensores e válvulas, e, após essa inspeção, procede-se à limpeza cuidadosa para

eliminar resíduos ou contaminantes presentes no equipamento. Em seguida, todas as peças e componentes do biorreator são montados de acordo com as especificações do projeto, e os sensores responsáveis pela medição de parâmetros físicos, como temperatura, pH e pressão, são instalados de forma apropriada. Para assegurar a vedação do sistema, verifica-se a estanqueidade do biorreator, assegurando que não existam vazamentos.

Além disso, todos os sensores são calibrados para garantir medições precisas dos parâmetros durante o processo de cultivo. O meio de cultura é preparado com os ingredientes necessários, como água, nutrientes, sais e outras substâncias relevantes para o crescimento microbiano. A esterilização completa é realizada, abrangendo o biorreator, o meio de cultura e todas as linhas de entrada e saída, sendo importante para prevenir contaminações indesejadas durante o cultivo.

Após a esterilização, procede-se à inoculação do microrganismo ou células no meio de cultura estéril. Inicia-se então o monitoramento contínuo dos parâmetros físicos, físico-químicos e biológicos durante todo o cultivo, com ajustes automáticos dos controles conforme necessário para manter as condições ideais. Ao atingir as metas de crescimento ou produção, realiza-se a colheita dos microrganismos, seguida do processamento de acordo com as exigências do processo industrial, que podem incluir filtração, centrifugação ou purificação.

Finalizado o ciclo de cultivo, executa-se uma limpeza completa do biorreator e de todos os componentes, preparando-os para o próximo ciclo de produção, e realizam-se manutenções preventivas, reparos e substituições de peças conforme necessário. Para assegurar a rastreabilidade e qualidade do processo, todas as etapas, medições e resultados são registrados em relatórios detalhados, mantendo registros precisos ao longo do tempo.

Ao considerar os conceitos apresentados por diversos autores sobre bioinsumos, biorreatores, e sistemas e instrumentos de controle, destaca-se a importância de uma análise de viabilidade para a automação de reatores no processo de fabricação de bioinsumos. Compreender esses conceitos é crucial, dado o aumento da demanda dos produtores por alternativas economicamente viáveis que permitam a fabricação de produtos de alta qualidade em grande escala, atendendo às exigências do mercado. A automação desses reatores não apenas melhora a

eficiência e a consistência dos processos produtivos, mas também oferece uma solução prática para alcançar a sustentabilidade e competitividade no setor.

4 DESENVOLVIMENTO

Na indústria biotecnológica, a automação desempenha um papel fundamental na otimização dos processos de produção, especialmente no contexto dos biorreatores. Os biorreatores, equipamentos essenciais para o cultivo de células microbianas e a produção de uma variedade de produtos biológicos, podem ser operados manualmente ou automatizados. No entanto, a transição da operação manual para a automação requer considerações detalhadas, especialmente no que diz respeito aos custos envolvidos (STANBURY *et al.*, 2003).

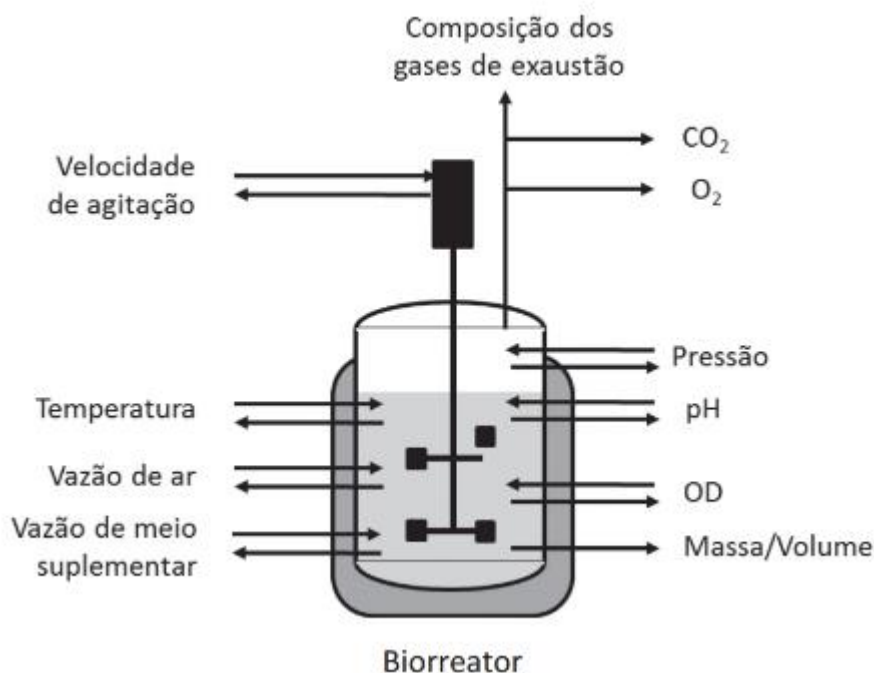
O presente capítulo tem como foco discorrer as etapas de concepção do projeto para a automatização do biorreator, abrangendo uma explicação minuciosa dos elementos, dispositivos de detecção, mecanismos de acionamento e o sistema de controle associados à automação. Além disso, será abordada a análise das dificuldades e das considerações práticas inerentes a esse processo de elaboração. E por fim, será realizado o levantamento de custo desse projeto.

Segundo MARCHESAN (2018), a automação de biorreatores é fundamental para garantir a eficiência, a qualidade e a segurança em processos que envolvem o cultivo de microrganismos para diversos fins industriais e de pesquisa. Ela desempenha um papel crucial na modernização e no aprimoramento das operações envolvidas na biotecnologia e em outras áreas relacionadas.

Para iniciar o desenvolvimento do projeto de automação, foi conduzido um levantamento abrangente das variáveis a serem controladas, juntamente com uma análise detalhada das especificações do biorreator já em uso. De acordo com SCHMIDELL (2022), um conjunto essencial de variáveis ambientais precisa ser monitorado e controlado em processos de biotecnologia, incluindo temperatura, pH, agitação, aeração, OD, pressão, nível, espuma e concentrações de gases. Essas medidas são obtidas em tempo real e fornecem informações sobre o metabolismo celular.

A Figura 8 apresenta um biorreator e suas principais variáveis de controle.

Figura 8: Biorreator



Fonte: *Biotechnologia Industrial* (2021, p.342)

4.1 Controle de pH

De acordo com Schuler et al (2003), controlar o pH na produção de bioinsumos é fundamental para garantir a eficácia dos microrganismos, como bactérias e fungos, utilizados na agricultura. O pH ideal promove o crescimento eficiente e a atividade metabólica das células microbianas, resultando em maior produção de biomassa e compostos bioativos. Além disso, mantém a viabilidade e a qualidade dos produtos, prevenindo contaminações e assegurando sua eficácia em condições agrícolas variáveis. Portanto, um controle rigoroso do pH é essencial para a compatibilidade dos bioinsumos com o ambiente de aplicação e para o sucesso na agricultura sustentável.

O controle automático de pH em biorreatores para a produção de bactérias e fungos envolve um sistema que monitora e ajusta continuamente o pH do meio de cultivo. Esse sistema inclui sondas de pH, controladores de pH, bombas de dosagem, e reservatórios de soluções ácidas e básicas. A sonda mede o pH, o controlador compara com o valor desejado e aciona as bombas para corrigir desvios, mantendo o pH na faixa ideal. Esse controle é essencial para otimizar o crescimento microbiano, garantir a estabilidade e qualidade do processo, reduzir a intervenção manual, e aumentar a eficiência econômica (SCHMIDELL *et al.*, 2021).

Tendo como base as referências mencionadas, fica evidente que o controle de pH é uma estratégia essencial durante o processo de fermentação, implementado como um sistema de malha fechada.

Para garantir a produção ideal de *Bradyrhizobium* e *Azospirillum*, é crucial manter o pH em torno de 7. No entanto, devido às complexas reações físico-químicas que ocorrem durante a fermentação, o pH tende a flutuar, o que inibe o crescimento dos microrganismos e prejudica sua reprodução.

Nesse contexto, o controle em malha fechada é conduzido por um analisador de pH InPro 3253i, responsável por monitorar a variável de processo (PV). Para ajustar o pH, ácido ou base são adicionados através de bombas peristálticas, controladas por um motor de passo que permite variar a velocidade e, conseqüentemente, a quantidade de solução adicionada. Para garantir precisão nesse controle, um bloco PID nativo do CLP Delta é empregado.

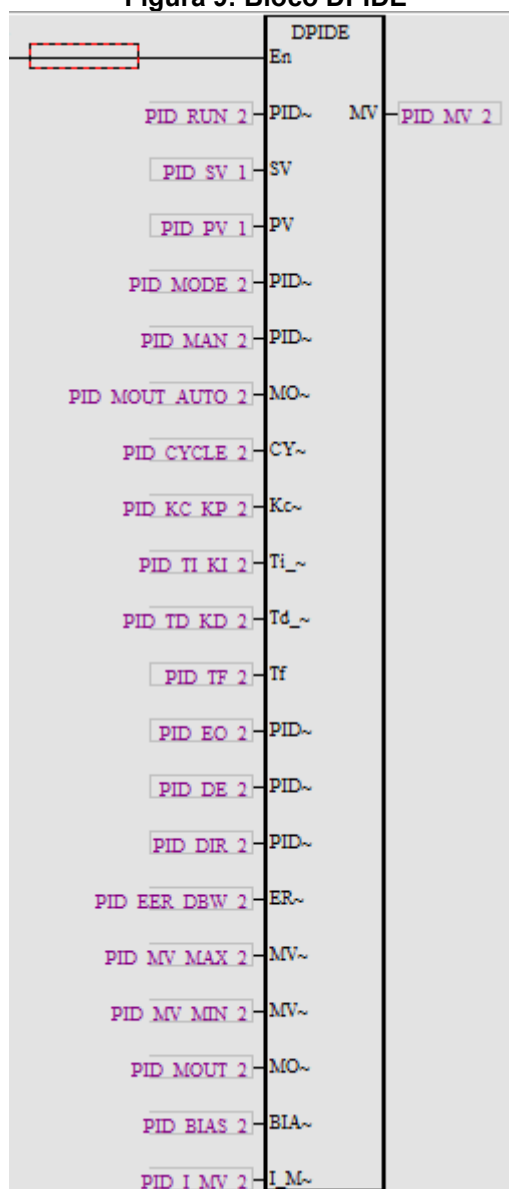
No sistema, o valor do pH é armazenado na variável PID_PV, enquanto o ponto de ajuste é definido pelo operador através de um campo dedicado na interface homem-máquina (IHM), sendo armazenado na variável PID_SV. Os parâmetros do controlador PID, como ganho proporcional, integral e derivativo, são configurados também através da IHM.

As saídas do bloco PID geram pulsos com frequência variável entre MV_MAX e MV_MIN, onde MV_MAX representa a máxima velocidade da bomba e MV_MIN indica a parada total da mesma. No sistema, dois blocos PID são utilizados, um para controlar a adição de ácido e outro para base.

O bloco responsável pelo controle do ácido atua de maneira indireta, acionando sua respectiva bomba quando o pH excede o ponto de ajuste, permitindo a injeção de ácido proporcionalmente à variação do pH. Por outro lado, o bloco para controle da base opera de forma direta, acionando a bomba para injetar base ao meio de cultura quando o seu pH está abaixo do ponto de ajuste. Esses blocos garantem uma regulação precisa do pH durante todo o processo de fermentação.

A Figura 9 apresenta um bloco DPIDE, esse bloco é nativo do CLP Delta e é utilizado em controles onde são necessários o ajuste proporcional, integral e derivativo da malha de controle.

Figura 9: Bloco DPIDE

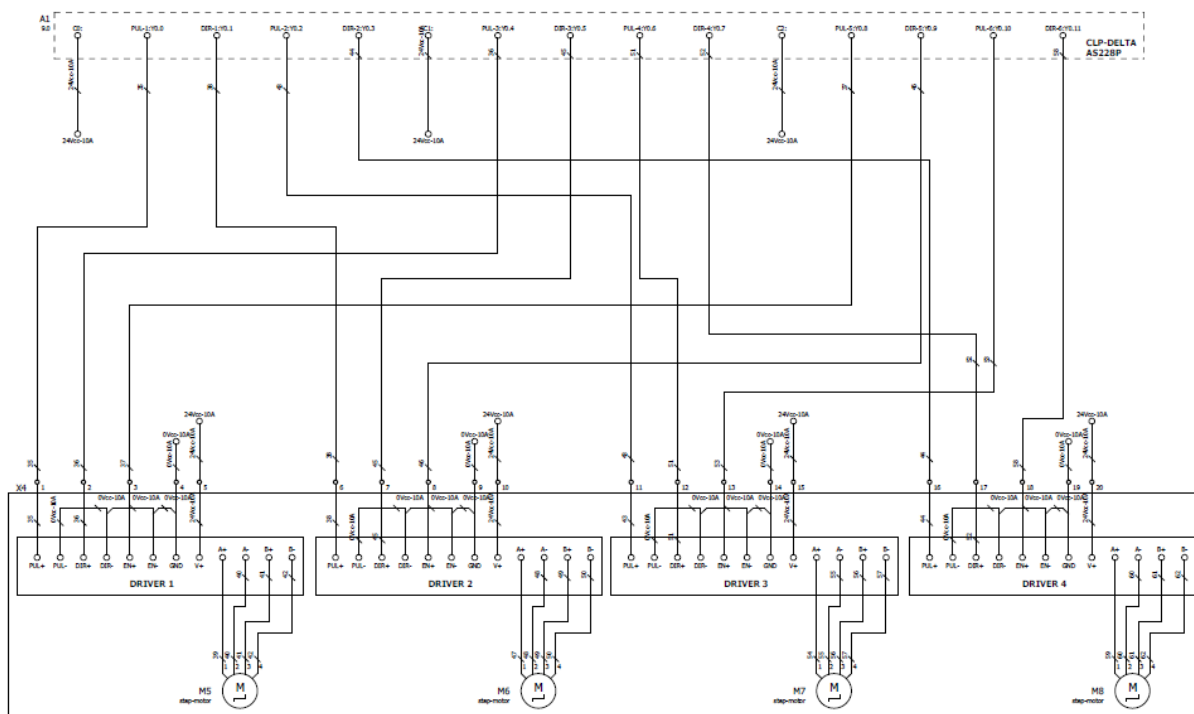


Fonte: Autoria própria (2023)

Para o acionamento do motor de passo foi utilizado um drive DM566 ele possui tensão de entrada que pode variar de 20 a 50VDC e fornece de 1,4 a 5,6A, podendo ser ajustado em até 8 níveis com resolução de 0,5A. É um driver que fornece um sistema de suavidade, torque e estabilidade.

A Figura 10 apresenta a conexão elétrica entre os drivers DM556 e o cartão de saídas digitais do CLP. Esse drivers, sob comando do CLP, são responsáveis pelo controle de movimento dos motores de passo das bombas peristálticas.

Figura 10: Esquema de conexão dos drivers DM556

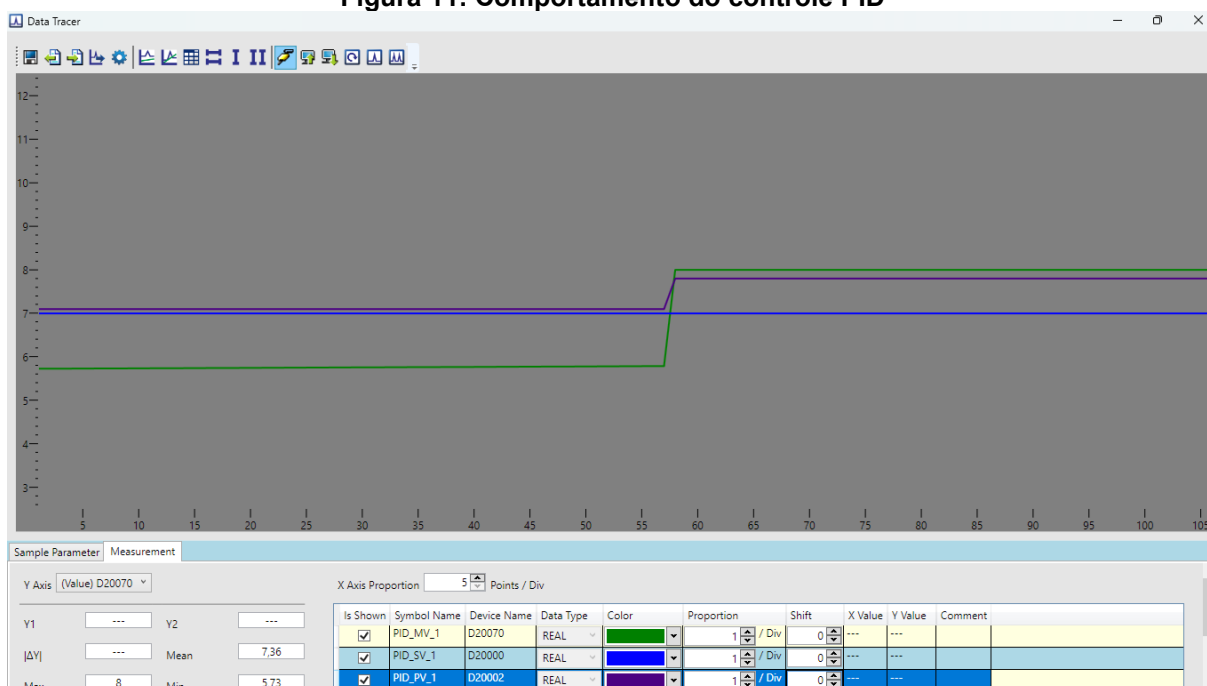


Fonte: Autoria própria (2023)

A sintonia da malha PID para o controle de pH foi realizada utilizando o método de tentativa e erro. Essa foi a escolha necessária devido à considerável variabilidade na concentração de ácido e base nas soluções, além das diferenças no tipo de meio de cultura. Devido a essas variabilidades, os parâmetros definidos para um determinado processo não são aplicáveis a outros.

A Figura 11 simula o comportamento do controle PID utilizado no projeto para controle de pH.

Figura 11: Comportamento do controle PID

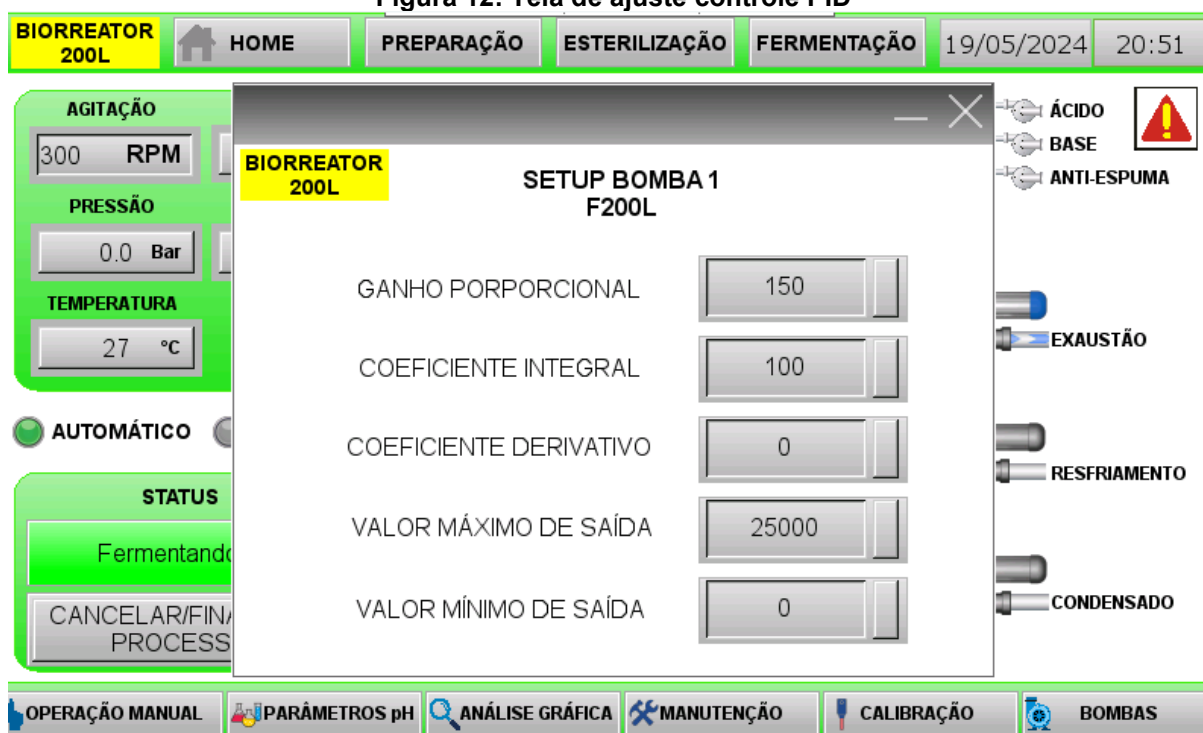


Fonte: Autoria própria (2023)

Para facilitar os ajustes necessários, foi criada uma interface auxiliar que permite ao operador ajustar a malha PID de cada bomba peristáltica conforme a demanda de cada processo específico. Na seção onde os valores dos parâmetros da malha são inseridos, foram estabelecidos limites de segurança para evitar que o controle perca a estabilidade. Dessa forma, o sistema mantém a flexibilidade necessária para diferentes condições operacionais, enquanto garante a segurança e a eficiência do controle de pH.

A Figura 12 apresenta a tela de parâmetros para ajuste do controle PID das bombas peristálticas.

Figura 12: Tela de ajuste controle PID



Fonte: Autoria própria (2023)

Apesar das dificuldades iniciais na sintonia da malha de pH, o controle demonstrou-se altamente eficiente. A malha PID operou de forma estável, sem apresentar instabilidades, e a variação do pH manteve-se dentro de 0,2 unidades em relação ao set-point estabelecido. Dessa forma, o uso de um controlador PID para o controle de pH provou ser eficaz em cumprir seus objetivos. No entanto, essa estratégia por si só não é suficiente para garantir um ambiente ideal para a maximização da produção de microrganismos. A otimização desse processo também depende do controle de outras variáveis, como a temperatura, que será discutido no capítulo seguinte.

4.2 Controle de temperatura

O controle de temperatura na produção de bactérias e fungos em biorreatores é essencial para otimizar o crescimento e a produtividade dos microrganismos, pois cada espécie tem uma faixa de temperatura específica para crescimento eficiente. Além disso, a atividade enzimática máxima ocorre em condições de temperatura precisas, o que aumenta a taxa de reações bioquímicas e a produção de metabólitos desejados. Manter a temperatura adequada também garante a qualidade do produto final, evitando a formação de subprodutos indesejados e a degradação de compostos

importantes, assegurando que os bioinsumos produzidos atendam aos padrões de pureza e consistência exigidos (SCHMIDELL *et al.*, 2021).

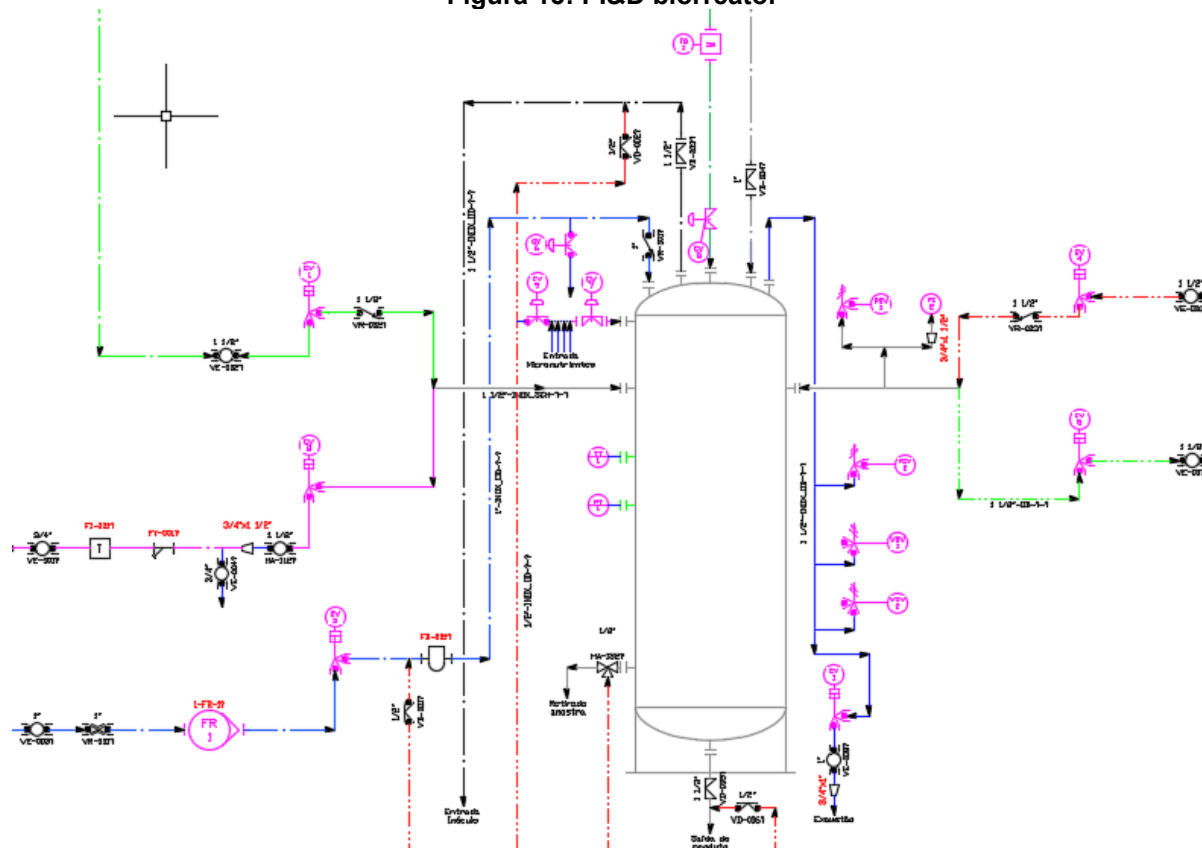
Um controle preciso da temperatura é crucial para a viabilidade e a saúde das células microbianas, prevenindo estresse térmico e danos celulares que poderiam levar à inativação enzimática ou morte dos microrganismos. Além disso, ajuda a minimizar o risco de contaminação por microrganismos indesejados, favorecendo um ambiente de cultivo ideal. A temperatura afeta a solubilidade de gases e nutrientes, influenciando a eficiência geral do bioprocessamento, e contribui para a estabilidade operacional do processo de fermentação ou cultivo, tornando-o previsível e repetível (SHULER *et al.*, 2003).

Para o controle de temperatura no biorreator, optou-se pela implementação de um sistema de controle on-off. No interior do equipamento, uma serpentina desempenha o papel crucial na troca térmica, seja para o aquecimento por meio da circulação de vapor ou para o resfriamento mediante a passagem de água fria.

Para o aquecimento, duas válvulas são acionadas: uma para a entrada de vapor e outra para a saída de condensado. Já para o resfriamento, outras duas válvulas são ativadas, uma para a entrada de água fria e outra para o retorno da água.

A Figura 13 apresenta o fluxograma de todos os instrumentos necessários para automatização de um biorreator.

Figura 13: PI&D biorreator

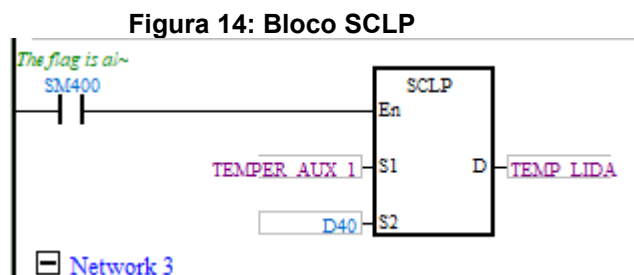


Fonte: Autoria própria (2023)

A fonte de calor adotada é uma caldeira que produz vapor saturado, enquanto o resfriamento é realizado por meio de um chiller associado a uma torre de resfriamento.

Para a leitura precisa da temperatura, um sensor do tipo PT-100 foi empregado, conectado a uma entrada analógica 4-20mA do CLP. O sinal analógico é convertido em pulsos digitais com uma frequência variando entre 0 e 2000 pulsos, sendo processado pelo bloco SCLP e armazenado na memória TEMP_LIDA, representando a variável de processo de temperatura.

A Figura 14 apresenta o bloco SCLP, usado para escalonar variáveis. Nesse caso o bloco foi utilizado para escalonar o sinal da entrada analógica correspondente ao sensor de temperatura.



Fonte: Autoria própria (2023)

Durante as etapas de esterilização, resfriamento e fermentação, essa variável é utilizada para comparações com os set-points de temperatura, orientando a execução de suas respectivas funções.

Uma das principais dificuldades encontradas no controle de temperatura foi a relação entre o gradiente de temperatura e o aquecimento por igual em todo o biorreator, pois esse é um aspecto crucial para garantir um ambiente de cultivo ideal e a eficácia dos bioprocessos. Manter uma distribuição uniforme de temperatura em todo o biorreator é essencial para o crescimento celular uniforme e a consistência do produto final. Para isso, são utilizados sistemas de aquecimento eficientes e sistemas de resfriamento dimensionados adequadamente.

O controle automatizado e o monitoramento contínuo da temperatura foram fundamentais para gerenciar gradientes de temperatura e garantir a eficiência do processo em todas as etapas do cultivo microbiano. Além disso, um sistema de agitação bem dimensionado foi de extrema importância para o sucesso desse controle.

4.3 Controle de agitação

O sistema de agitação em um biorreator é fundamental para manter condições ideais de cultivo para os microrganismos. Ele garante a homogeneização do meio de cultivo, promovendo a distribuição uniforme de nutrientes, oxigênio e outros elementos essenciais, evitando gradientes de concentração que poderiam afetar o crescimento celular. Além disso, a agitação facilita a transferência de massa, promovendo a dissolução de gases como o oxigênio na fase líquida, o que é essencial para a respiração celular e a produção eficiente de metabólitos desejados (STANBURY *et al.*, 2003).

O biorreator já possuindo um motor de indução trifásico 60Hz de 3CV conectado ao eixo de agitação, para o controle de velocidade foi utilizado um

inversor de frequência CFW500 da fabricante WEG. A comunicação entre a IHM e o inversor de frequência se deu por meio da comunicação ModBus RTU. A velocidade de agitação é configurada por meio da IHM que também exibi o status do motor e possíveis falhas.

A Figura 15 apresenta a tela criada para controlar e monitorar a velocidade e o status do motor de agitação.



Fonte: Autoria própria (2023)

O sistema de agitação demonstrou eficiência. No entanto, há a possibilidade de integrar o controle ao sistema de aeração automático. Dessa forma, a agitação teria uma modulação automática de velocidade sempre que necessário promovendo o aumento ou diminuição da oxigenação do meio, visando aprimorar a eficiência do bioprocessamento.

4.4 Sistema de enchimento automático

Um sistema de enchimento automático em um biorreator é fundamental para manter condições de cultivo ideais ao longo do processo. Ele garante a precisão no controle do volume de meio de cultivo dentro do biorreator, assegurando que permaneça dentro dos limites desejados. Além disso, a automação do processo reduz significativamente a possibilidade de erros operacionais, permitindo uma operação

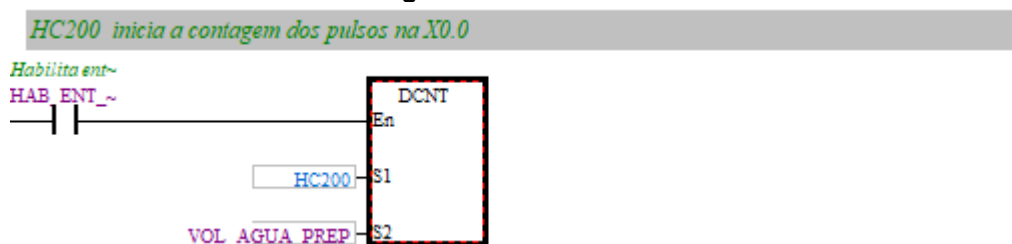
mais confiável e consistente. Com a liberação dos operadores de tarefas repetitivas de enchimento manual, o sistema aumenta a eficiência e a produtividade do processo, permitindo que os recursos humanos sejam direcionados para outras atividades mais estratégicas. Em processos contínuos, o sistema de enchimento automático proporciona uma operação ininterrupta do biorreator, garantindo uma produção estável e consistente ao longo do tempo (STANBURY *et al.*, 2003).

Para implementação do sistema de enchimento automático foi selecionado um Medidor de vazão do tipo turbina, por ser um equipamento com custo reduzido em relação a outros e possuir grande precisão, além de ser de fácil manutenção.

A sua seleção foi baseada na tubulação de entrada de água do biorreator a na vazão da água de processo. Sua integração a automação se deu por uma conexão a uma entrada digital rápida do PLC onde cada pulso corresponde a um volume fixo. Esses pulsos são contabilizados por um contador rápido HC200 e armazenados na variável VOL_ÁGUA_PREP que posteriormente são comparadas ao set-point. Ao atingir o valor predeterminado, o PLC executa o fechamento da válvula de entrada de água do processo que interrompe o enchimento. Na sequência um alarme sonoro e visual é emitido pela IHM avisando ao operador que a o enchimento foi concluído.

A Figura 16 apresenta o bloco DCNT utilizado para incrementar pulsos em uma variável do tipo double word.

Figura 16: Bloco DCNT



Fonte: Autoria própria (2024)

O enchimento automático foi de fácil implementação, entretanto, nos testes iniciais, sujeira vindo da caixa de água do processo bloqueou a turbina interrompendo a contagem dos pulsos, o que ocasionou um transbordamento do nível de água do biorreator. Para evitar que isso ocorra novamente, foi inserido um filtro “Y” na tubulação a montante do medidor.

A Fotografia 6 apresenta a instalação do medidor de vazão do tipo medidor de vazão em um biorreator. Sua instalação deve seguir alguns requisitos, entre eles, respeitar os espaçamentos definidos pelo o fabricante entre as conexões e outros

instrumentos, a fim de evitar um escoamento turbulento do fluido causando uma medição incorreta da vazão.

Fotografia 6: Medidor de vazão instalado



Fonte: Autoria própria (2023)

4.5 Controle automático do nível de espuma.

A presença de espuma pode afetar a transferência de massa e a distribuição de nutrientes e gases (como oxigênio) no meio de cultivo. Isso pode prejudicar o crescimento e a produtividade dos microrganismos, impactando negativamente a eficiência do processo. Além disso, a espuma ocupa volume dentro do biorreator que deveria ser utilizado para o meio de cultivo. Se a espuma não for controlada, ela pode reduzir a capacidade efetiva do biorreator, limitando a quantidade de produto que pode ser produzido (STANBURY *et al.*, 2003).

Para evitar a formação de espuma do biorreator foi utilizado um controle do tipo on-off, para isso foi instalado um relé de nível DPX 123 juntamente com o eletrodo KPN-A do fabricante Digimec. Seu funcionamento se baseia na medição de nível de espuma, basicamente quando a espuma toca o eletrodo, conduz uma corrente elétrica, este emite um sinal para o CLP que através de uma bomba peristáltica, injeta um volume pré determinado de antiespumante.

Apesar de sua simplicidade, esse sistema se mostrou eficaz no controle do nível de espuma no biorreator. A principal dificuldade encontrada durante a implementação foi encontrar uma haste de sensor compatível com o “*Hard Space*” do biorreator, além de identificar um sensor resistente à corrosão. Isso era crucial, pois o biorreator passa por um processo de limpeza CIP (Cleaning in Place) que utiliza soluções altamente agressivas para metais. Em resposta a essas necessidades,

optou-se por um sensor fabricado em aço inoxidável 304, que oferece a durabilidade e resistência química necessárias para garantir um desempenho confiável e duradouro.

1 "Hard space". Refere-se ao espaço físico disponível dentro do biorreator ou tanque para a instalação de componentes essenciais, como sensores, agitadores, defletores, tubos e outros dispositivos necessários para o processo.

4.6 Controle de pressão

O controle de pressão em biorreatores é essencial para garantir a segurança, eficiência e qualidade dos processos biotecnológicos. Manter a pressão dentro de limites seguros preserva a integridade estrutural do equipamento, prevenindo falhas catastróficas e prolongando a vida útil do reator. Além disso, a pressão controlada melhora a solubilidade de gases críticos como oxigênio e dióxido de carbono, o que é vital para o metabolismo dos microrganismos e, conseqüentemente, para a produtividade do processo (SCHMIDELL *et al.*, 2021).

A estabilidade da pressão também é crucial para manter condições consistentes e previsíveis dentro do biorreator, afetando diretamente a eficiência dos processos biológicos e a qualidade do produto final. Flutuações de pressão podem alterar parâmetros como pH e temperatura, influenciando negativamente o crescimento e a atividade dos microrganismos, além de possibilitar a produção de subprodutos indesejados. Portanto, um controle preciso de pressão não só contribui para a estabilidade operacional e a repetibilidade do processo, mas também ajuda a prevenir contaminações e garantir a pureza dos bioinsumos produzidos (SHULER *et al.*, 2003).

O controle de pressão foi implementado utilizando um transmissor de pressão com selo sanitário e conexão tri-clamp. O range do sensor é de -1 a 3 bar, o que permite a detecção tanto de pressão positiva quanto de pressão negativa (vácuo). O sensor se comunica com o CLP por meio de uma entrada analógica 4-20mA, que converte a leitura em um sinal digital variando entre 0 e 2000 pulsos. Este sinal é então processado pelo bloco SCLP e armazenado na variável PRESSAO_INT.

O valor da pressão é constantemente comparado com os set-points estabelecidos pelo operador. O sistema foi configurado para tomar ações automáticas caso a pressão interna do biorreator ultrapasse os valores seguros de operação. Entre

essas ações estão a abertura forçada da exaustão e o cancelamento do processo se a pressão interna exceder a pressão de projeto do equipamento. Outra ação crucial é a abertura forçada da válvula de aeração caso seja detectada pressão negativa, para evitar a implosão do biorreator.

A implementação do controle de pressão foi fundamental, pois, além de assegurar a qualidade do produto final, promove a segurança das pessoas e do equipamento, evitando danos que poderiam comprometer o processo e resultar em falhas operacionais. Ao garantir que a pressão permaneça dentro dos limites seguros, o sistema protege tanto a qualidade do bioprocessamento quanto a durabilidade dos componentes envolvidos, contribuindo para a eficiência e a confiabilidade da operação.

4.7 Válvulas de bloqueio

Em um biorreator industrial, diversos tipos de válvulas são utilizados para controlar o fluxo de líquidos e gases. No entanto, apenas válvulas especiais são adequadas para pontos críticos onde a manutenção da esterilidade e a integridade do produto e do meio ambiente são fundamentais. Para escolher a válvula mais apropriada, deve-se considerar se ela atende adequadamente às necessidades do processo, se mantém as condições de assepsia e contenção ambiental, se resiste às condições de trabalho (como pH, temperatura e pressão), se é resistente à corrosão, o tipo de instalação (rosca, flange ou solda) e se a relação custo-benefício é favorável. (SCHMIDELL *et al.*, 2021)

No referido projeto, foram empregadas válvulas de controle específicas, incluindo válvulas de assento ou pistão com atuador pneumático para regular o fluxo de vapor, condensado, água de resfriamento e retorno, bem como válvulas para entrada de ar e exaustão. Além disso, para o controle da entrada de água de processo, optou-se por uma válvula diafragma com atuador pneumático. Essa seleção criteriosa de válvulas permite o ajuste preciso e confiável do fluxo em diferentes pontos do sistema, garantindo o desempenho adequado e a eficiência operacional do processo industrial em questão.

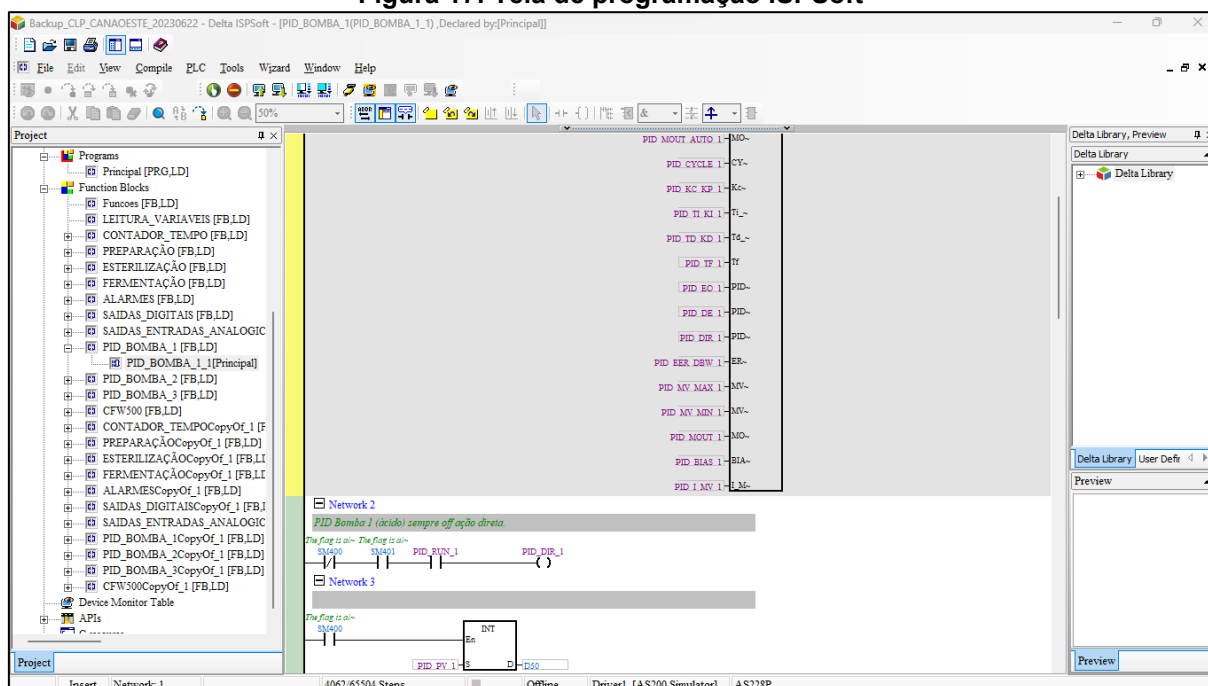
4.8 Desenvolvimento do programa CLP e IHM

Este tópico detalha o processo de desenvolvimento da programação do Controlador Lógico Programável (CLP) e da Interface Homem-Máquina (IHM) com o objetivo de automatizar o biorreator manual, utilizando a rede ModBus para comunicação entre os analisadores de pH e oxigênio dissolvido e o sistema de controle. Segundo Silva (2016), um controlador Lógico Programável (CLP), também conhecido como PLC (Programmable Logic Controller), é um dispositivo eletrônico sólido e industrial projetado para armazenar instruções que controlam processos e implementam funções e blocos lógicos em um sistema. Ele lida com sequenciamento lógico, temporização, contagem, operações lógicas e aritméticas, manipulação de dados e comunicação em rede. O CLP é o equipamento responsável pelo controle automatizado das atividades na planta industrial. Já a Interface Homem-Máquina (IHM) desempenha um papel essencial em sistemas de controle e automação industrial, permitindo a interação entre seres humanos e máquinas automatizadas. Ela pode se apresentar de várias formas, como painéis de toque, monitores de computador ou dispositivos móveis, possibilitando que operadores controlem e monitorem processos industriais. A IHM fornece informações sobre o estado do processo, permitindo ajustes e configurações, e desempenha um papel vital na segurança, alertando sobre eventos críticos. Além disso, registra dados para análise, oferece uma interface intuitiva e implementa controles de acesso. Em ambientes industriais, a IHM melhora a eficiência operacional, contribuindo para a tomada de decisões informadas e garantindo operações mais seguras e eficazes (“HMI: Human-Machine Interface”, [s.d.]).

A seleção adequada do CLP e da IHM foi um passo essencial, levando em consideração os requisitos de comunicação ModBus. Optou-se pelo CLP AS228T e a IHM escolhida foi a DOP-107EV ambos fabricados pela DELTA. O CLP escolhido apresenta 4 entradas analógicas nativas para conexão dos sensores de pressão e temperatura, além de 10 saídas rápidas utilizadas para controlar quatro motores de passo das bombas peristálticas dosadoras de nutrientes e soluções. Adicionalmente, o CLP possui 2 portas para comunicação ModBus RTU, utilizadas para se comunicar com a IHM e com o conversor de frequência CFW-500, responsáveis pelo controle de agitação.

A IHM DOP-107 está equipada com duas portas seriais, uma destinada à comunicação com a instrumentação analítica, por meio dos transmissores M-100 da Mettler Toledo, e a outra para comunicação com o CLP. Foi desenvolvido o programa de controle do CLP utilizando a linguagem Ladder, abrangendo lógicas para controlar o agitador, a aeração, pressão, temperatura, pH e garantir a segurança do processo. A programação do CLP foi realizada utilizando o ISPSOft da DELTA como apresentado na Figura 17, esse software é utilizado para programar controladores lógicos programáveis (CLPs) da série AH500 e outros modelos. Ele suporta diversas linguagens de programação, permite configurar hardware, oferece simulação e depuração de programas, facilita o monitoramento em tempo real e inclui ferramentas de diagnóstico. Essencial para engenheiros e técnicos em automação, o ISPSOft simplifica o desenvolvimento e gestão de projetos de controle industrial.

Figura 17: Tela de programação ISPSOft

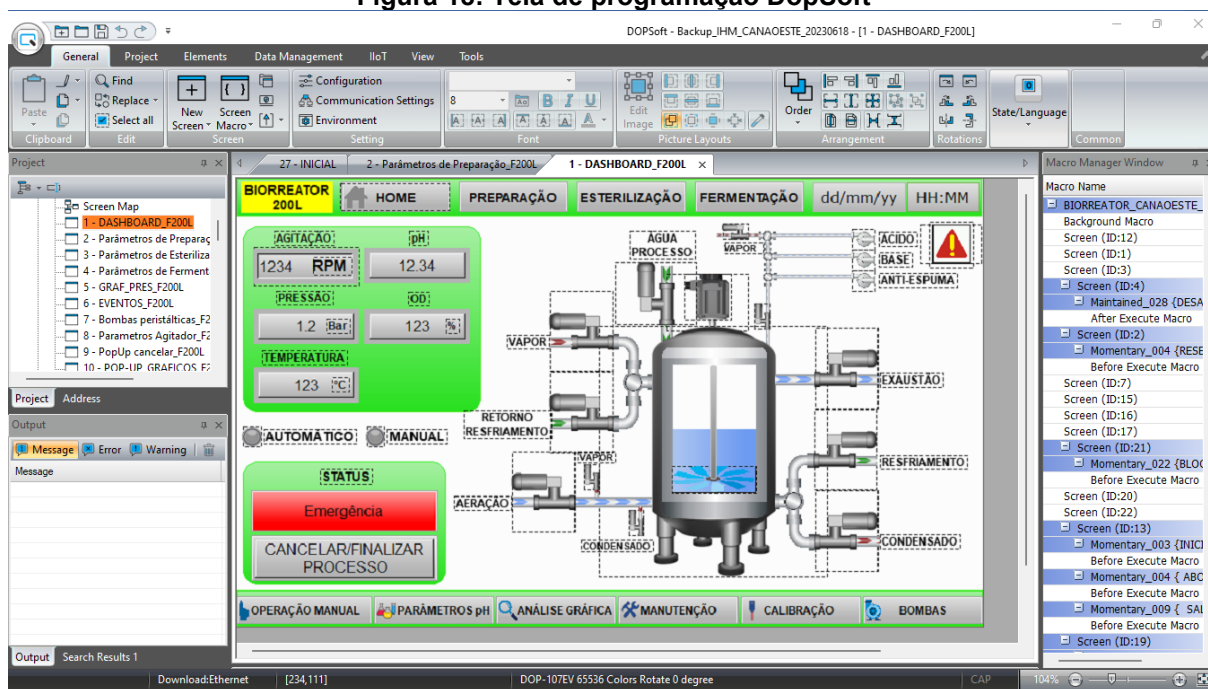


Fonte: Autoria própria (2023)

Além disso, configurou-se a comunicação Modbus na IHM para permitir a leitura de dados dos analisadores de pH e oxigênio dissolvido. Para a programação da IHM, utilizou-se o software gratuito DOPSOFT, disponibilizado no site da DELTA. Foi desenvolvido telas na IHM para exibir informações cruciais, como o status do biorreator, valores de pH e oxigênio dissolvido, bem como controles para operação manual. A Figura 18 apresenta a tela do DopSoft, um software utilizado para programar e configurar interfaces homem-máquina (IHMs) da série DOP. Ele permite

criar interfaces gráficas, configurar a comunicação com controladores lógicos programáveis (CLPs), simular e testar a IHM, e oferece ferramentas de diagnóstico e manutenção. Essencial para engenheiros e técnicos em automação industrial, o DopSoft facilita a operação e monitoramento de sistemas automatizados.

Figura 18: Tela de programação DopSoft



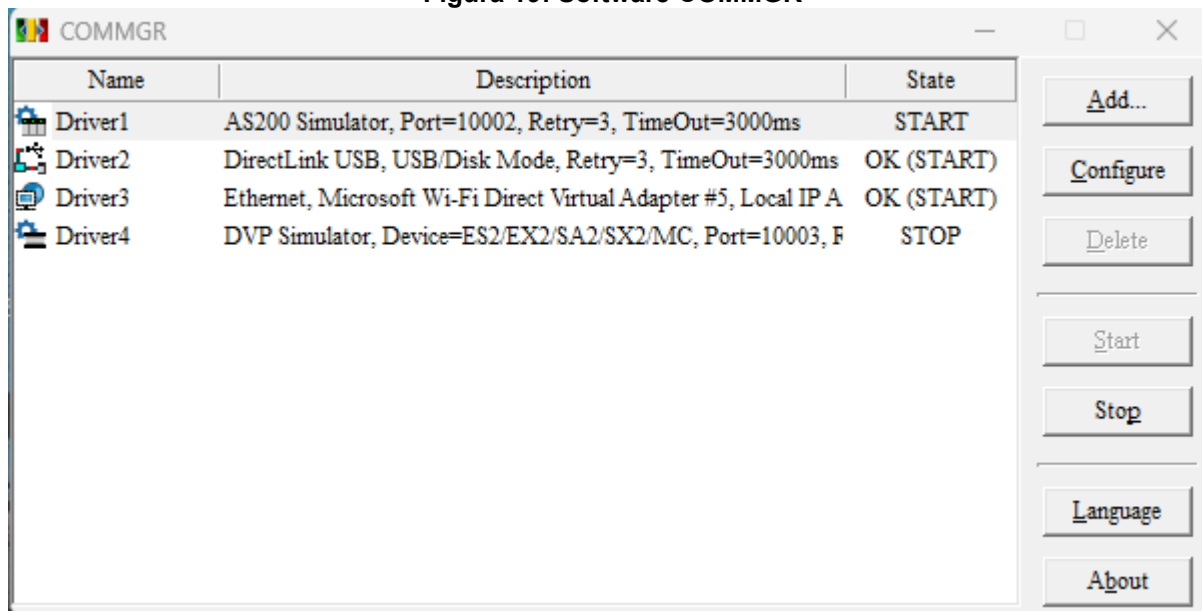
Fonte: Autoria própria (2023)

Os testes de simulação do programa do CLP e IHM foram realizados com o software COMMGR, disponível no site da DELTA. A comunicação Modbus também foi configurada na IHM para exibir os dados lidos dos analisadores de pH e oxigênio dissolvidos em tempo real. Posteriormente, foram conduzidos testes de funcionamento para assegurar que o CLP realizasse o controle do biorreator de forma adequada e que a IHM exibisse os dados corretamente. Os problemas ou erros identificados durante os testes foram solucionados com ajustes na programação do CLP ou da IHM.

A Figura 19 apresenta o COMMGR da DELTA, esse software gerencia e configura a comunicação entre dispositivos de automação, como CLPs e IHMs. Ele facilita a configuração de redes industriais, administração de dispositivos, monitoramento e diagnóstico de comunicação, e assegura a segurança dos dados transmitidos. Essencial para a comunicação eficiente e segura em sistemas de

automação industrial, o COMMGR simplifica a gestão de redes complexas e integração de dispositivos.

Figura 19: Software COMMGR



Fonte: Autoria própria (2023)

Concluindo o desenvolvimento, elaborou-se uma documentação técnica completa, incluindo manuais de operação e manutenção para o sistema de automação do biorreator. O treinamento fornecido aos operadores e pessoal de manutenção do biorreator abordou o uso correto do sistema de automação, incluindo a IHM. Por fim, o sistema de automação foi implementado no ambiente de produção do biorreator, com a garantia de que todos os componentes funcionem conforme o esperado.

Para a elaboração do diagrama elétrico do painel e automação dos biorreatores, utilizou-se o software EPLAN, uma ferramenta poderosa que oferece eficiência no desenvolvimento de sistemas de automação. O projeto teve início com uma reunião com o cliente para compreender seus requisitos específicos, incluindo parâmetros de controle, sensores necessários e funcionalidades desejadas.

Todas as especificações técnicas foram devidamente documentadas, incluindo informações sobre os biorreatores, como capacidade, tipos de sensores, faixas de temperatura, velocidades de agitação, entre outros. Em seguida, foi iniciado um novo projeto no software EPLAN, definindo o nome do projeto e as configurações iniciais, como unidades de medida e escalas.

Dados relevantes como a lista de componentes, especificações técnicas e informações de layout, foram importados. A inserção dos componentes elétricos necessários no diagrama começou incluindo disjuntores, relés, CLP, IHM, fontes de alimentação, bornes, entre outros.

O diagrama elétrico ficou organizado em páginas individuais para diferentes partes do painel de automação, como alimentação, controle e sensores. A conexão dos componentes elétricos foi realizada de acordo com as especificações do projeto, utilizando as ferramentas de fiação do EPLAN.

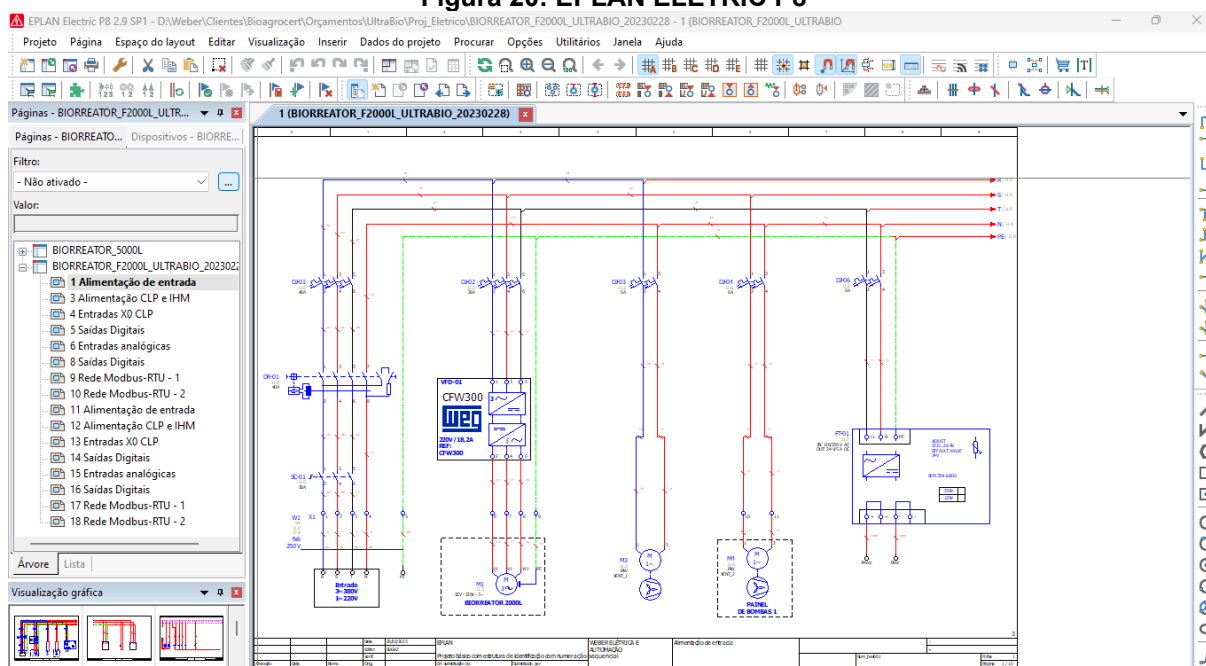
Linhas de fiação foram desenhadas, cabos foram identificados e a rotulagem adequada foi aplicada para garantir a clareza do diagrama. Uma revisão interna do diagrama elétrico foi conduzida para identificar erros ou omissões, assegurando a precisão das informações.

O diagrama elétrico preliminar foi apresentado à equipe de programação para revisão e validação, garantindo que atendesse aos requisitos iniciais definidos. Após a aprovação da equipe, o diagrama elétrico foi finalizado, incluindo todas as conexões, etiquetas e informações necessárias.

Utilizando o EPLAN, foi gerada automaticamente uma lista de materiais completa, incluindo todos os componentes elétricos necessários para o painel de automação. Foram também geradas etiquetas para todos os componentes e cabos no diagrama elétrico, facilitando a identificação e a montagem.

A Figura 20 apresenta a interface do software EPLAN Electric P8, ele é utilizado para projetar e documentar sistemas elétricos de automação. Além disso, permite criar diagramas elétricos detalhados, automatizar tarefas de design, gerir dados do projeto, integrar com outros sistemas de engenharia, e simular e verificar os sistemas projetados. Essencial para engenheiros elétricos, o EPLAN Electric P8 aumenta a precisão e a eficiência no desenvolvimento de sistemas elétricos complexos.

Figura 20: EPLAN ELETRIC P8



Fonte: Autoria própria (2023)

A correta montagem do painel de automação desempenha um papel fundamental no projeto de automação de bioprocessos, garantindo o funcionamento eficiente e seguro desses equipamentos. Para realizar essa atividade, foi crucial revisar minuciosamente os projetos elétricos e de automação, que devem conter diagramas elétricos, especificações de componentes, listas de materiais e requisitos funcionais.

Com base nos projetos, foram requisitados todos os componentes necessários, como disjuntores, CLPs, IHMs, sensores, relés, entre outros. Esses componentes foram identificados e organizados de acordo com o projeto para facilitar a montagem.

A instalação dos componentes foi realizada em um painel de aço inoxidável, devido a sua resistência à corrosão, levando em consideração o espaço para ventilação e futuras manutenções. Os componentes foram fixados de acordo com as especificações do projeto e as normas de segurança, garantindo que estejam seguros e acessíveis. Os cabos foram passados cuidadosamente pelas canaletas, seguindo um roteamento organizado e evitando sobreposição entre cabos de potência e comando.

As conexões elétricas foram feitas conforme o projeto, seguindo os diagramas elétricos, e certificando-se de apertar corretamente todos os terminais. Dispositivos de proteção, como fusíveis e disjuntores, foram instalados para garantir a segurança

elétrica do sistema. A continuidade elétrica é verificada em todas as conexões, assegurando que não haja mau contato ou curtos-circuitos.

Realizou-se testes de funcionamento em todos os componentes, incluindo o CLP, a IHM e sensores, para garantir que funcionem conforme o esperado. Quaisquer erros ou problemas identificados durante os testes foram prontamente solucionados. Além disso, todos os componentes, como fios e cabos, foram identificados de acordo com as tag's definidas no projeto, o que facilitará futuras manutenções e intervenções.

A Figura 21 apresenta o painel de comando após que foi montado e depois instalado no biorreator manual.

Figura 21: Painel de comando



Fonte: Autoria própria (2023)

Esse processo detalhado de montagem de um painel de automação para biorreatores assegura que o sistema funcione com sucesso, atendendo às necessidades específicas do cliente e seguindo as normas e regulamentos aplicáveis.

A Fotografia 7 apresenta o biorreator em que foi instalado o novo sistema de automação.

Fotografia 7: Biorreator do estudo de caso



Fonte: Autoria própria (2023)

4.9 Resultado da pesquisa de campo

A análise das respostas obtidas na pesquisa sobre a eficiência na automação do biorreator revelou resultados bastante positivos, conforme detalhado a seguir:

- Questão: "Desde a automação do biorreator, houve uma melhoria na eficiência da produção?"

- Resultado: Todas as 3 pessoas entrevistadas responderam que sim.

- Percentual de melhoria estimado:

- 1 pessoa indicou uma melhoria de 60%

- 1 pessoa indicou uma melhoria de 80%

- 1 pessoa indicou uma melhoria de 90%

- Questão: "O tempo necessário para completar um ciclo de produção diminuiu após a automação?"

- Resultado: As 3 pessoas entrevistadas responderam que sim.

- Questão: "A automação do biorreator resultou em uma melhoria na qualidade do produto final?"

- Resultado: Todas as 3 pessoas responderam que sim.

- Questão: "Houve uma redução na variabilidade dos lotes de produção após a automação?"

- Resultado: 2 das 3 pessoas responderam que sim.

- Questão: "A automação do biorreator levou à redução de custos operacionais?"

- Resultado: Todas as 3 pessoas responderam que sim.

- Áreas de redução de custos:

- 1 pessoa mencionou redução em matéria-prima

- 2 pessoas mencionaram redução em mão de obra

- Questão: "A automação do biorreator melhorou a segurança do trabalho na operação?"

- Resultado: Todas as 3 pessoas responderam que sim.

- Questão: "A automação permitiu um monitoramento em tempo real mais eficaz do processo?"

- Resultado: Todas as 3 pessoas responderam que sim.

Os dados acima demonstram uma percepção unânime dos entrevistados quanto aos benefícios trazidos pela automação do biorreator em diversos aspectos, incluindo eficiência, qualidade, segurança e redução de custos operacionais. A única exceção foi na variabilidade dos lotes de produção, onde uma pessoa não observou a mesma melhoria percebida pelas outras duas. Essas informações indicam que a automação não só tem potencial para otimizar o processo produtivo, mas também para garantir uma operação mais segura e economicamente viável.

4.10 Custos relacionados a automação do biorreator.

Na indústria biotecnológica, a automação desempenha um papel fundamental na otimização dos processos de produção, especialmente no contexto dos biorreatores. Esses equipamentos são essenciais para o cultivo de células microbianas e a produção de uma variedade de produtos biológicos. Podem ser operados manualmente ou automatizados, no entanto a transição da operação manual para a automatizada requer considerações detalhadas, especialmente no que diz respeito ao investimento envolvido.

Neste capítulo serão informados os principais custos associados à automação do biorreator em questão, destacando os fatores que os influenciam e a importância de uma análise criteriosa da implementação desse projeto. Ao compreender a particularidade de cada processo, os profissionais da indústria biotecnológica poderão tomar decisões estratégicas de customização do biorreator, para melhorar a eficiência operacional e a qualidade dos produtos finais, otimizando o valor do investimento necessário.

A composição dos custos deste projeto foi dividida em nove grupos distintos, sendo eles: Painel de comando e Hardware, Válvulas e acessórios, Sensores e Transmissores, Instrumentação analítica, Pneumática, Bombas peristálticas e drivers, Tubos e conexões, Mão de obra e Biorreator.

O primeiro grupo, Painel de comando e Hardware, refere-se aos componentes utilizados na montagem do painel, incluindo gabinete em aço inox 304, CLP, IHM, inversor de frequência, disjuntores, fontes de alimentação 24Vcc, botões e demais acessórios. No segundo grupo, Válvulas e Acessórios, estão as válvulas de bloqueio automáticas e manuais, como válvulas diafragma, de assento, esfera, controle de fluxo, além de acessórios de tubulações como purgadores, válvula de segurança e retenção.

O grupo Sensores e Transmissores incluem sensores de pressão e temperatura sanitários, além do medidor de fluxo (Medidor de vazão). A Instrumentação analítica abrange analisadores de pH e oxigênio dissolvido, juntamente com seus acessórios para comunicação e conexão ao processo. No grupo pneumático, encontram-se as válvulas de comando pneumático e acessórios como bloco manifold, conexões, lubrificador, mangueiras e bobinas. O grupo Bombas peristálticas e drivers contempla quatro bombas peristálticas e seus respectivos drivers de comunicação com o CLP.

Tubos e conexões incluem tubos em aço inox e aço carbono, além de conexões como niples, abraçadeiras, curvas, tees e demais acessórios. O grupo Mão de obra engloba o projeto de programação e projeto elétrico, montagem de painel de comando eletrônico e pneumático, instalação e solda dos instrumentos e tubulações, além do comissionamento do projeto em campo.

Por último, o grupo Biorreator que compreende ao reator em aço inox 304 fabricando conforme a norma ASME BPE, serpentina interna, encamisado com

volume útil de 1000 litros e agitação mecânica. Os valores foram obtidos através de cotações com fornecedores especializados e são apresentados na Tabela 1.

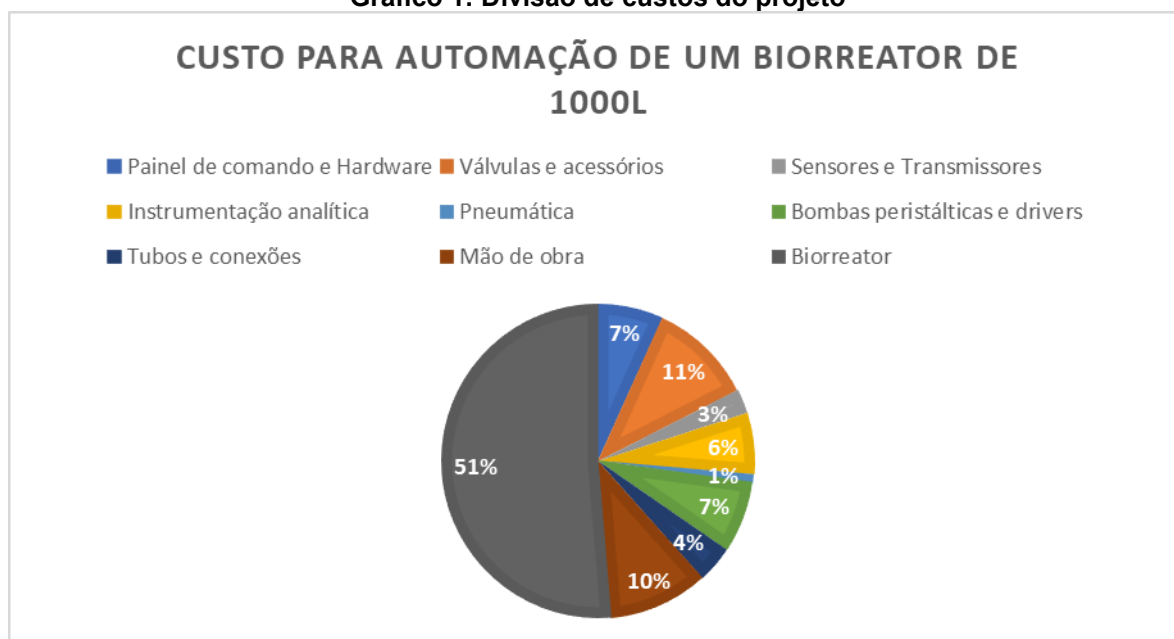
Tabela 1: Relação de custos do projeto

Grupo	Valor
Painel de comando e Hardware	R\$ 27.750,00
Válvulas e acessórios	R\$ 44.084,00
Sensores e Transmissores	R\$ 10.190,00
Instrumentação analítica	R\$ 25.536,00
Pneumática	R\$ 3.550,00
Bombas peristálticas e drivers	R\$ 30.000,00
Tubos e conexões	R\$ 15.500,00
Mão de obra	R\$ 42.500,00
Biorreator manual	R\$ 210.000,00
Total	R\$ 409.110,00

Fonte: Autoria própria (2023)

Esta divisão detalhada permite uma análise precisa dos custos envolvidos no projeto de automação do biorreator, facilitando a comparação com os custos de aquisição de um novo biorreator automatizado. Essa abordagem possibilita identificar as áreas onde os custos podem ser otimizados e fornece uma base sólida para a tomada de decisões.

Gráfico 1: Divisão de custos do projeto



Fonte: Autoria própria (2023)

4.11 Comparativo de preços

Foi realizado um levantamento de mercado junto a fabricantes e fornecedores de biorreatores automatizados. Os valores variaram de acordo com a capacidade e especificações técnicas dos equipamentos. Para este estudo, considerou-se um biorreator de especificações equivalentes ao modelo que foi automatizado, com um custo R\$785.990,00.

A Figura 22 foi retirada de um orçamento real fornecido por uma empresa fabricante de biorreatores industriais automatizados. Para preservar a identidade da empresa o modelo dos biorreatores foi ocultado.

Figura 22: Orçamento biorreator comercial automatizado

Descrição	Equipamentos	Unitário
Inoculantes: Bradyrhizobium e Azospirillum	Biorreator Reator	12 2 199.990,00
	Biorreator .200 (para inóculo)	629.990,00
	Biorreator .1000 (para inóculo)	785.990,00
	Biorreator .5000	1.069.990,00
Inseticidas: Beauveria e Isaria	Biorreator .200 (para inóculo)	629.990,00
	Biorreator .1000 (para inóculo)	785.990,00
	Biorreator .5000	1.069.990,00

Fonte: Autoria própria (2023)

Baseado nesse projeto o valor total para a aquisição de um biorreator manual e sua posterior automação foi estimado em R\$409.000,00. No entanto, é importante destacar que, em muitos casos, os fabricantes de bioinsumos já possuem biorreatores operando de forma manual e buscam melhorar sua produção por meio da automação.

Nessas situações, ao desconsiderar o custo do biorreator, o investimento necessário, por exemplo, para automatizar um biorreator de 1000L já existente seria inferior a R\$200.000,00. Esta abordagem de automatizar biorreatores oferece uma solução mais econômica e eficiente, permitindo que as empresas aprimorem suas operações sem a necessidade de adquirir novos equipamentos.

5 CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo principal analisar o projeto de automação de um biorreator manual, avaliando seu desempenho na produção de bioinsumos e comparando os custos necessários para automatização de um biorreator, com o investimento necessário para adquirir um equipamento de mercado já automatizado. O intuito foi oferecer uma alternativa de baixo custo para empresas do setor que buscam melhorar seus processos e aumentar sua competitividade. Para isso, foi desenvolvido e apresentado um projeto de automação de um biorreator manual, focando na otimização do controle de variáveis críticas do processo biotecnológico. O estudo detalhou todas as etapas de concepção do projeto, incluindo a seleção de componentes, sensores, atuadores e software utilizados na automação. Além disso, foram discutidos os desafios e considerações práticas enfrentadas durante o desenvolvimento, assim como os custos associados à implementação da automação.

A automatização apresentou-se como uma solução viável e eficaz para melhorar a eficiência, a qualidade e a segurança dos processos biotecnológicos. A integração de sensores e atuadores permitiu o monitoramento e controle em tempo real das variáveis ambientais, como pH, temperatura, agitação, pressão e nível, contribuindo para a estabilidade e consistência do processo de fermentação. Além disso, a automação reduziu a intervenção manual, minimizando erros operacionais e aumentando a eficiência econômica.

Os resultados obtidos demonstraram que o equipamento foi capaz de garantir um ambiente de cultivo ideal para o crescimento e a produtividade dos microrganismos, resultando em uma maior produção de biomassa e compostos bioativos. A implementação de sistemas de controle de pH, temperatura, agitação, pressão e nível proporcionou uma operação mais estável e previsível, contribuindo para a maximização do rendimento do processo biotecnológico.

Além disso, a análise dos custos relacionados ao projeto permitiu uma avaliação criteriosa do investimento necessário, demonstrando uma economia significativa em comparação com a aquisição de um novo biorreator automatizado. A customização do projeto de automação possibilitou atender às necessidades específicas do processo e integrar tecnologias existentes na planta industrial, agregando valor e maximizando o retorno sobre o investimento.

Em suma, o projeto de automação do biorreator manual apresentou resultados promissores, destacando-se como uma solução eficiente para melhorar a eficiência operacional e a qualidade dos produtos finais na indústria biotecnológica.

Para aprimorar o trabalho sobre a produção de *Beauveria* no biorreator automatizado, recomenda-se a implementação de uma análise quantitativa detalhada dos principais parâmetros de cultivo. Esta análise deve incluir a medição da concentração de células viáveis (UFC/mL), a determinação da taxa de crescimento (μ), a avaliação da produtividade (biomassa ou produto por unidade de volume e tempo), além do monitoramento do pH, temperatura, oxigenação e consumo de substrato ao longo do tempo. Os dados coletados em intervalos regulares devem ser utilizados para gerar curvas de crescimento e calcular a eficiência do uso do substrato.

Para trabalhos futuros, recomenda-se a exploração da automação de biorreatores utilizando informações de variáveis do processo obtidas em tempo real, integradas a algoritmos avançados. O uso de redes neurais pode ser eficaz para inferir a concentração celular com alta precisão, a partir de dados de entrada como pH, temperatura, oxigenação, produção de gás carbônico e consumo de substrato. Além disso, a aplicação de lógica difusa (fuzzy) pode ser implementada para identificar o momento ideal de finalizar o cultivo, levando em conta a complexidade e a incerteza inerente aos processos biológicos. Essa abordagem combinada de redes neurais e lógica difusa permitirá um controle mais preciso e adaptativo, aumentando a eficiência e a produtividade do cultivo de *Beauveria*, além de possibilitar ajustes em tempo real para otimização contínua do processo.

REFERÊNCIAS

- BATALHA, M. O. **Gestão Agroindustrial**. Rio de Janeiro: Grupo GEN, 2021. E-book. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788597028065/>. Acesso em: 10 jun. 2023.
- BENZ, G.T. Bioreactor Design for Chemical. **Engineers American Institute of Chemical Engineers**. v. 107, n. 2126, p. 13, ago. 2011. Disponível em: <https://www.aiche.org/resources/publications/cep/2011/august/bioreactor-design-chemical-engineers> Acesso em: 20 out. 2023.
- BERNARDINO, D. Qual é a diferença entre os dados primários e secundários? **Questionpro** [s.l.]. Disponível em: <https://www.questionpro.com/blog/pt-br/dados-primarios-e-secundarios/>. Acesso em: 2 out. 2023.
- BIECHELE, P. et al. Sensor systems for bioprocess monitoring. **WILEY Analytical Science**. v. 15, p. 469-488, abr. 2015. DOI: <https://doi.org/10.1002/elsc.201500014> Acesso em: 10 nov. 2023.
- BLASTER. **Medidor de vazão tipo Rotâmetro BL**. s/d. Disponível em: <https://www.blastercontroles.com.br/produtos/medidor-de-vazao/rotametros/rotametro-bl/>. Acesso em: 14 jun. 2024.
- BRUNO, A. N. **Biotecnologia II: Aplicações e Tecnologias**. Brasil: Artmed Editora, 2016.
- CONCEITOS. Ministério da Agricultura e Pecuária. **Conheça a base conceitual do Programa Nacional de Bioinsumos**. [s.l.]: Ministério da Agricultura e Pecuária, 06 abr.2021. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/inovacao/bioinsumos/o-programa/conceitos> Acesso em: 4 set. 2023.
- DERENCIO, R. **Transmissor de pressão resistivo**. Disponível em: https://blog.wika.com.br/know-how/principio-funcionamento-transmissor-pressao/?doing_wp_cron=1686534572.4392840862274169921875. Acesso em: 28 maio. 2024.
- DUARTE, G. M. et al. **Análise de pH e teor de cloro ativo em águas sanitárias comerciais e clandestinas**. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso - Curso Técnico em Química, Escola Técnica Etec Júlio da Mesquita, Santo André, 2022. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788582713853/>. Acesso em: 07 jun. 2023.
- ENGCO. **Biorreator Industrial**. s/d. Disponível em: <https://www.engco.com.br/equipamentos/biorreator-industrial-biofabpro>. Acesso em: 14 jun. 2024
- FRANCHI, C. M. **Instrumentação de Processos Industriais - Princípios e Aplicações**. 1. Ed. São Paulo: Érica, 2015. E-book. ISBN 9788536519753. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788536519753/>. Acesso em: 10 jun. 2023.

FRANCHI, L. **Bradyrhizobium e Azospirillum**: o que são, sinergia e importância. [s.l]: Agrovadores, (20 jul. 2020). Disponível em: <https://agro.genica.com.br/2020/07/20/bradyrhizobium-e-azospirillum/> Acesso em: 7 set. 2023.

GREEN. A. **Electronic Instrumentation for Safe and Reliable Measurements in High-Pressure Applications**. s/d. Disponível em: <https://blog.wika.us/applications/electronic-instrumentation-for-safe-and-reliable-pressure-measurements-in-high-pressure-applications/>. Acesso em: 14 jun. 2024.

INDUCTIVE AUTOMATION. **HMI: Human-Machine Interface**: What is HMI, Common Uses, Trends and the Future of HMI. 2018. Disponível em: <https://inductiveautomation.com/resources/article/what-is-hmi>. Acesso em: 8 out. 2023.

LORENCETTI, G. A. T. et al. EFICIÊNCIA DE *Beuveria Bassiana* e *Isaria* para o controle de *Thaumastocoris Peregrinus*. **Ciencia Florestal**, Florianópolis, v. 28 n. 1. 2 abr. 2018. Florianópolis: UFSC (2018) Disponível em: <https://doi.org/10.5902/1980509831612> Acesso em: 3 out. 2023.

MAGAR. S. T. **Bioreactor: Design, Principle, Parts, Types, Uses, Diagram**. 23 maio 2024. Disponível em: <https://microbenotes.com/bioreactor/>. Acesso em: 14 jun. 2024.

MARCHESAN, V. F. **CONSTRUÇÃO DE CONTROLADOR DE BIORREATOR PARA FINS DIDÁTICOS DE BAIXO CUSTO UTILIZANDO ARDUINO E TESTES DE VIABILIDADE**. 2018. 70 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Bioprocessos e Biotecnologia, Universidade Estadual do Rio Grande do Sul, Bento Gonçalves, 2018.

MEYER, M.C et al. **Bioinsumos na cultura da soja**. 1. ed. Distrito Federal: Embrapa, 2022. E-book. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1143066/bioinsumos-na-cultura-da-soja> Acesso em: 21 nov 2023.

MOLINO, J. V. D. **PRODUÇÃO DE PROTEÍNAS HETERÓLOGAS EM MICROALGA**. 2003. 132 f. Tese (Doutorado) - Curso de Ciências Farmacêuticas, Faculdade de Ciências Farmacêuticas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/9/9134/tde-12052003-162321/pt-br.php>. Acesso em: 11 jun. 2023.

SCHMIDELL, W. **Biotecnologia Industrial - Vol. 2: Engenharia Bioquímica**. São Paulo: Editora Blucher, 2021. E-book. ISBN 9786555060195. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9786555060195/>. Acesso em: 07 jun. 2023.

SHULER, M. L.; FIKRET K. **Bioprocess engineering**: basic concepts. Uttar Pradesh, India: Pearson, 2003.

SILVA, E. A. **Introdução às linguagens de programação para CLP**. São Paulo: Editora Blucher, 2016. E-book. ISBN 9788521210528. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788521210528/>. Acesso em: 08 out. 2023.

SOUZA, F. P.; CASTILHO, T. P. R.; MACEDO, L. O. B. **Sustainability Debate Brasília**: Um marco institucional para os bioinsumos na agricultura brasileira baseado na economia ecológica. v. 13, n. 1, p. 266-285, 2022.

STANBURY, P. F.; WHITAKER, A.; HALL, S. J. **Principles of fermentation technology**. Amsterdam; Oxford Butterworth-Heinemann, 2003.

VIDAL, M. C. et al. Bioinsumos: a Construção de um Programa Nacional pela Sustentabilidade do Agro Brasileiro. **Economic Analysis of Law Review**, v. 12, n. 3, p. 557-574, 2021.

VITOLLO, M. **Biotecnologia farmacêutica**. São Paulo: Blucher, 2015. E-book. ISBN 9788521208105. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788521208105/>. Acesso em: 13 jun. 2024.