

RONALDO JUNIOR FERNANDES

**IMPLEMENTAÇÃO DE PRÁTICAS INOVADORAS COM O USO DE
EQUIPAMENTOS PILOTOS EM ENGENHARIA QUÍMICA: PREPARAÇÃO PARA
APLICAÇÃO FUTURA NO ENSINO TÉCNICO**

Relatório de Pós-doutorado realizado na
Universidade Estadual Paulista “Júlio de
Mesquita Filho” (UNESP) na Unidade do
Instituto de Química de Araraquara.

Supervisora: Dra. Kelly Johana Dussán
Medina

PROGRAMA DE PÓS-DOCTORADO DA UNESP

Araraquara – SP

2026

RESUMO

O projeto propõe a implementação e avaliação de práticas pedagógicas diferenciadas no ensino técnico e superior em Engenharia Química, por meio do uso de equipamentos piloto aliados a metodologias ativas, com destaque para a Aprendizagem Baseada em Projetos (PBL). A iniciativa busca superar a fragmentação entre teoria e prática, recorrente na formação técnica, aproximando os estudantes da realidade industrial por meio de experiências experimentais em escala semi-industrial. Serão utilizados equipamentos como plantas de produção de biodiesel, etanol, cerveja e um *Spray Dryer*, integrados ao uso de *softwares* de simulação de processos, permitindo uma abordagem híbrida que articula experimentação, modelagem e resolução de problemas reais. O projeto foi planejado para ser desenvolvido nos cursos Técnicos em Química e Açúcar e Alcool do IFSP - Campus Matão e no curso de Engenharia Química da UNESP, promovendo a integração entre diferentes níveis de ensino. Metodologicamente, trata-se de uma pesquisa-ação com abordagem quantitativa, envolvendo a elaboração de roteiros experimentais, aplicação de intervenções pedagógicas baseadas em PBL e avaliação dos impactos na aprendizagem e também da motivação e desenvolvimento de competências técnicas e colaborativas dos estudantes. A coleta de dados foi estabelecida por meio de questionários pré e pós-intervenção, entrevistas, autoavaliações reflexivas e observações em diário de campo. Espera-se que o projeto contribua para o fortalecimento da formação prática, o aumento do engajamento discente e a melhoria da compreensão dos conceitos fundamentais da Engenharia Química, além da produção de materiais didáticos replicáveis e do estímulo a ações extensionistas, ampliando a articulação entre academia, ensino técnico e demandas da indústria regional.

Palavras chaves: Engenharia Química; Ensino Técnico; Plantas Piloto; PBL; Inovação Educacional.

1. INTRODUÇÃO

Os processos químicos desempenham um papel fundamental em diversos setores industriais e tecnológicos, exigindo a formação de profissionais altamente qualificados. No entanto, o ensino tradicional enfrenta desafios na integração entre teoria e prática, o que pode dificultar a compreensão e aplicação de conceitos essenciais. Nesse contexto, o uso de equipamentos pilotos surge como uma abordagem inovadora para aproximar os estudantes da realidade industrial, tornando a aprendizagem mais dinâmica e aplicada.

A iniciativa busca proporcionar uma experiência de aprendizado imersiva, simulando operações unitárias em média escala e conectando os estudantes aos desafios reais dos processos industriais. Para isso, serão utilizados equipamentos como um *Spray Dryer* (Figura 1), uma planta de produção de biodiesel (Figura 2), uma de produção de etanol (Figura 3) e outra de produção de cerveja (Figura 4). Além disso, a integração com *softwares* de simulação como o SuperPro Designer permitirá o desenvolvimento de protocolos experimentais detalhados e a criação de materiais didáticos, capacitando tanto professores quanto estudantes.

O projeto será implementado nos cursos Técnicos em Química e Açúcar e Alcool integrados ao ensino médio do Instituto Federal de São Paulo, campus Matão (IFSP-Matão), com o objetivo de proporcionar uma experiência alinhada às necessidades desses alunos que trabalharão em equipes durante todas as atividades desenvolvidas. Atualmente, essas turmas não têm acesso a aulas práticas em laboratórios específicos que ensinem os conceitos básicos de operações unitárias em processos industriais, o que limita a compreensão dos fenômenos envolvidos e a aplicação dos conhecimentos adquiridos em sala de aula. Além disso, ele também será aplicado no curso de Engenharia Química da UNESP, onde os estudantes terão, pela primeira vez, contato direto com plantas pilotos, possibilitando uma compreensão mais aprofundada da aplicação prática dos conceitos estudados ao longo da graduação.

Figura 1 - Secador do tipo *spray dryer* do Departamento de Engenharia Química da Unesp de Araraquara



Figura 2 - Planta de produção de biodiesel do Departamento de Engenharia Química da Unesp de Araraquara



Figura 3 - Planta de produção de etanol do Departamento de Engenharia Química da Unesp de Araraquara



Figura 4 - Planta de produção de cerveja do Departamento de Engenharia Química da Unesp de Araraquara



Por fim, essa experiência teve como intuito proporcionar ao pós-doutorando uma base teórica e técnica robusta para atuar nos cursos técnicos de sua instituição, além dos cursos de graduação em Engenharia de Alimentos e Energias, nos quais também leciona. Ao término do projeto, espera-se estabelecer parcerias estratégicas com outras instituições de ensino por meio de ações extensionistas, fortalecendo a conexão entre a academia e a formação de profissionais qualificados para atender às demandas da indústria regional.

1.2 Referencial Teórico

A modernização do Ensino Técnico em Química e da Engenharia Química exige inovações e adaptações pedagógicas que preparem os estudantes para os desafios do mercado industrial e tecnológico. Mais do que transmitir conhecimentos teóricos, é fundamental desenvolver habilidades essenciais como alfabetização digital, pensamento crítico e lógico, capacidade inventiva, resolução de problemas por meio da integração de múltiplas competências e trabalho colaborativo (Cleophas, 2022). Para isso, estratégias pedagógicas que incorporem simulações de processos industriais, estudo de casos reais, softwares específicos da área e práticas laboratoriais alinhadas às normas técnicas e de segurança podem fortalecer a qualidade da formação e garantir uma aprendizagem mais eficaz.

Estudos demonstram que a aprendizagem em grupo no ensino é mais eficiente do que a abordagem individual, pois simula o ambiente colaborativo e aprimora a comunicação entre os alunos. Metodologias ativas, como simulações, estudos de caso e atividades práticas em grupo, incentivam a troca de conhecimentos, o raciocínio coletivo e a resolução conjunta de problemas. Dessa forma, os estudantes se preparam melhor para os desafios do setor produtivo e para o trabalho em equipe no ambiente industrial (Domingues, 2018; Alcântara, 2004).

Nesse contexto de constantes transformações, o ensino Técnico em Química e de Engenharia Química deve ir além da sala de aula e dos métodos tradicionais, adotando abordagens diferenciadas que integrem teoria e prática de forma coerente. Ao evitar a fragmentação do conteúdo e conectar o conhecimento à sua aplicação real, a aprendizagem se torna mais dinâmica e

eficaz, estimulando a motivação dos estudantes e promovendo a construção de saberes diversos (Bordignon, 2022; Matsumoto, 2005).

Uma metodologia que se destaca nesse cenário é a Aprendizagem Baseada em Projetos (do inglês, *Project-Based Learning* - PBL), que propõe a resolução de problemas e desafios do mundo real, tornando a experiência educacional mais envolvente e significativa. Essa abordagem é capaz de aproximar os estudantes da realidade industrial, permitindo que desenvolvam habilidades técnicas e analíticas de forma prática e aplicada (Ricaurte, 2020; Santos, 2021). Ao integrar o PBL ao uso de equipamentos como plantas de produção de biodiesel, spray dryer, produção de cerveja e etanol, os alunos são desafiados a resolver questões reais, simulando operações unitárias em escala piloto. Essa metodologia não apenas fortalece a compreensão dos conceitos teóricos, mas também possibilita a aplicação desses conhecimentos em cenários que replicam processos industriais verdadeiros. Dessa forma, os estudantes se preparam para enfrentar os desafios do mercado de trabalho com maior segurança e competência.

Um aspecto fundamental dessa proposta é a transição do estudo de operações unitárias com equipamentos de bancada para o uso de plantas piloto em maior escala. Embora os equipamentos de bancada sejam essenciais para a introdução de conceitos básicos da engenharia química, eles frequentemente não refletem com fidelidade a complexidade dos processos industriais. As plantas piloto, por sua vez, proporcionam um ambiente mais representativo da realidade fabril, onde entram em cena variáveis como controle operacional, otimização de processos, segurança e logística.

Ao integrar essa transição com a metodologia PBL, os estudantes são desafiados a resolver problemas autênticos e contextualizados, promovendo o desenvolvimento de competências analíticas, técnicas e colaborativas. Essa abordagem favorece uma compreensão mais holística do funcionamento das indústrias químicas e fortalece a capacidade desses estudantes em aplicar o conhecimento teórico à solução de problemas reais em escala ampliada (Santos, 2021).

2. OBJETIVOS

Implementar e avaliar práticas pedagógicas diferenciadas utilizando equipamentos pilotos e metodologias ativas como a Aprendizagem Baseada em Projetos (PBL), visando integrar teoria, prática experimental e simulação para modernizar e aprimorar o ensino técnico e superior.

2.1 Objetivos Específicos:

- Selecionar equipamentos pilotos adequados para o ensino prático em Técnico em Química / Engenharia Química;
- Implementar a metodologia de Aprendizagem Baseada em Projetos (PBL), integrando teoria, prática experimental e simulação;
- Avaliar o impacto das práticas pedagógicas inovadoras na aprendizagem e motivação dos estudantes;
- Criar diretrizes claras para a replicação e adaptação da metodologia PBL nos cursos técnicos;
- Promover a integração entre o ensino técnico e superior, fortalecendo a formação prática e aplicada.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Levantamento e Seleção de Equipamentos Pilotos

Inicialmente, foi realizado um levantamento dos equipamentos disponíveis e de seu potencial didático para o para aplicação no projeto. Essa etapa incluiu a análise de acessibilidade, aplicabilidade e alinhamento com as demandas do setor industrial além da elaboração de roteiros adaptados às situações reais da indústria química.

3.2 Implementação da metodologia de Aprendizagem Baseada em Projetos (PBL)

A implementação da metodologia Aprendizagem Baseada em Projetos (PBL) foi orientada pela revisão crítica da literatura especializada e pela análise das necessidades específicas do ensino técnico do IFSP - Matão. Foram estruturadas práticas experimentais alinhadas a desafios reais enfrentados pelo setor industrial, integrando de maneira coerente conceitos teóricos e aplicações

práticas. A metodologia fará o uso do *software* de simulação *SuperPro Designer v13*, proporcionando uma abordagem híbrida que amplifica a experiência de aprendizagem, fortalecendo o raciocínio crítico e promovendo a resolução colaborativa de problemas. Posteriormente, esta metodologia será adaptada e implementada no contexto do ensino superior no curso de Engenharia Química da Unesp, garantindo assim uma formação robusta e alinhada às demandas atuais do mercado.

3.3 Tipo de Pesquisa

O projeto foi desenvolvido como uma pesquisa-ação com abordagem quanti-qualitativa, uma vez que se propõe a intervir diretamente na realidade dos cursos técnicos e superiores em Engenharia Química por meio da implementação de práticas pedagógicas diferenciadas, ao mesmo tempo em que avalia seus impactos através de múltiplas fontes de dados. A escolha dessa abordagem se justifica pela natureza aplicada do projeto, que visa à melhoria concreta do ensino técnico e à resolução de problemas educacionais específicos, sem o objetivo central de gerar uma teoria generalizável, como seria o caso em uma pesquisa exclusivamente experimental ou descritiva tradicional.

3.4 Participantes da Pesquisa

3.4.1 Critérios de inclusão

- Estudantes regularmente matriculados nos cursos Técnicos em Química e Açúcar e Alcool do IFSP - Campus Matão;
- Estudantes regularmente matriculados do curso de Engenharia Química da UNESP - Campus Araraquara;
- Participação voluntária mediante assinatura do Termo de Consentimento Livre e Esclarecido (TCLE).

3.4.2 Critérios de exclusão

- Estudantes que não aceitarem participar formalmente da pesquisa;
- Estudantes que estiverem com vínculo institucional inativo no período de aplicação das intervenções.

3.4.3 Gestão dos participantes

Todos os participantes serão previamente informados sobre os objetivos e procedimentos do projeto. A participação será voluntária, com garantia de anonimato, privacidade e direito de retirada a qualquer momento, conforme os princípios éticos da pesquisa com seres humanos (Resolução CNS nº 510/2016). Os dados coletados não serão utilizados para fins de avaliação acadêmica individual dos alunos.

3.5 Etapas da Pesquisa

A pesquisa será desenvolvida em etapas sequenciais e articuladas, contemplando desde o planejamento pedagógico até a avaliação dos resultados obtidos com as intervenções. As fases foram estruturadas de forma a garantir coerência metodológica, viabilidade prática e aderência aos objetivos do projeto. No Quadro 1 estão descritas as principais etapas, detalhando as ações previstas, sua finalidade e o momento em que ocorrerão ao longo da execução do trabalho.

Quadro 1 - Descrição das etapas das pesquisas

Etapas	Descrição
1. Levantamento e seleção dos equipamentos pilotos.	Identificação dos equipamentos disponíveis (planta de biodiesel, cerveja, etanol e <i>spray dryer</i>) e análise de seu potencial didático.
2. Elaboração dos roteiros práticos e protocolos didáticos.	Criação de materiais alinhados à realidade industrial e aos objetivos da intervenção pedagógica (Anexos II e III).
3. Ambientação e formação dos estudantes.	Introdução aos equipamentos e às metodologias de ensino utilizadas (PBL, simulação com software, etc.).
4. Implementação das intervenções pedagógicas.	Aplicação das práticas com PBL e uso dos equipamentos em turmas do ensino técnico e superior.

5. Aplicação dos instrumentos de avaliação.	Coleta de dados por meio de ferramentas quantitativas e qualitativas.
6. Análise dos dados e validação dos resultados.	Interpretação dos dados obtidos e ajustes nas práticas conforme os <i>feedbacks</i> .
7. Produção científica e disseminação.	Elaboração de artigos, relatórios e apresentações com os resultados da pesquisa.

3.6 Instrumentos de Coleta de Dados

Para avaliar os efeitos das intervenções propostas, serão utilizados instrumentos de coleta de dados quantitativos e qualitativos. A seleção dos instrumentos visa captar tanto aspectos objetivos quanto percepções dos participantes, garantindo uma análise ampla e integrada dos resultados obtidos. Essa coleta está descrita no Quadro 2.

Quadro 2 - Instrumentos de coleta de dados

Instrumento	Tipo de dado	Finalidade
Questionários estruturados (pré e pós-intervenção)	Quantitativo	Avaliar mudanças no conhecimento técnico e na percepção dos estudantes sobre o aprendizado.
Entrevistas semiestruturadas com voluntários	Qualitativo	Explorar a experiência dos participantes com as práticas e intervenções aplicadas.
Autoavaliações reflexivas escritas	Qualitativo	Estimular metacognição e identificar pontos fortes/dificuldades percebidas pelos próprios alunos.

Observações de aula com diário de campo	Qualitativo	Registrar a dinâmica das práticas, engajamento, cooperação e dificuldades observadas.
---	-------------	---

3.7 Cálculo Amostral

Considerando turmas médias de 30 a 35 estudantes em cada curso envolvido e com base na participação voluntária estimada, espera-se um público mínimo de 50 participantes. Para análises estatísticas básicas de comparação pré e pós-intervenção (como testes de médias ou frequência), esse número é suficiente, considerando um erro amostral de 10% e nível de confiança de 90%. O número exato será definido conforme o total de estudantes que aceitarem participar e assinarem o TCLE.

3.8 Avaliação e Validação

A avaliação da efetividade das práticas pedagógicas será conduzida de forma contínua e integrada, por meio de uma abordagem formativa e somativa, com ênfase em aspectos qualitativos e quantitativos ao longo de todo o processo. Acredita-se que a avaliação qualitativa deve funcionar como instrumento de apoio ao desenvolvimento integral do educando, promovendo avanços na construção de conhecimentos, habilidades e atitudes (Luckesi, 2013; Villas Boas, 2022).

No eixo formativo, serão considerados critérios como a criatividade na resolução de desafios, a coerência e profundidade do planejamento escrito, o domínio dos conceitos químicos aplicados durante a elaboração e mediação das atividades com as plantas piloto, além da capacidade reflexiva expressa nas autoavaliações após a resolução de problemas inspirados em situações industriais reais.

Já no eixo somativo e diagnóstico, será realizada a comparação entre os dados coletados nos questionários estruturados aplicados antes e depois das intervenções, além da análise qualitativa de entrevistas semiestruturadas com participantes voluntários. Essa abordagem visa mensurar o nível de

compreensão, retenção dos conteúdos e a capacidade dos estudantes de estabelecer conexões entre teoria e prática, bem como sua preparação para desafios reais da indústria química.

3.9 Instrumentos, Regularidade e Tempo de Aplicação

O projeto utilizará múltiplos instrumentos de coleta de dados, todos devidamente planejados com base em uma abordagem quanti-qualitativa. Abaixo, descrevemos detalhadamente cada ferramenta, o tipo de aplicação, sua periodicidade e tempo estimado de execução:

3.9.1 Questionário Estruturado Pré e Pós-Intervenção (Anexo I)

- Tipo: Autoaplicável (auto-responsivo), impresso ou digital.
- Objetivo: Avaliar conhecimentos prévios e percepções iniciais (pré), e identificar mudanças cognitivas e atitudinais após a intervenção (pós).
- Periodicidade: Uma aplicação antes das intervenções práticas e outra após a conclusão das atividades com os equipamentos pilotos.
- Duração estimada: 20 a 30 minutos por aplicação.

3.9.2 Autoavaliação Reflexiva Escrita

- Tipo: Autoaplicável.
- Objetivo: Promover a metacognição e identificar, pela perspectiva dos estudantes, os principais aprendizados, dificuldades e contribuições do projeto.
- Periodicidade: Ao final de cada atividade prática significativa (total de 2 a 3 aplicações por participante).
- Duração estimada: 10 a 15 minutos.

3.9.3 Entrevistas Semiestruturadas

- Tipo: Aplicação presencial individual ou em pequenos grupos, conduzida pelo pesquisador.
- Objetivo: Coletar percepções mais aprofundadas sobre a experiência dos estudantes, sua compreensão dos processos, e sugestões de melhoria.
- Periodicidade: Após a conclusão das intervenções, com amostra voluntária (até 10 participantes).
- Duração estimada: 30 a 40 minutos por entrevista.

3.9.4 Observação Direta com Diário de Campo

- Tipo: Aplicação pelo pesquisador durante as atividades práticas.
- Objetivo: Registrar comportamentos, participação ativa, cooperação em grupo, dificuldades não verbalizadas e resposta geral às intervenções.
- Periodicidade: Em todas as atividades práticas.
- Instrumento: Roteiro de observação qualitativa.

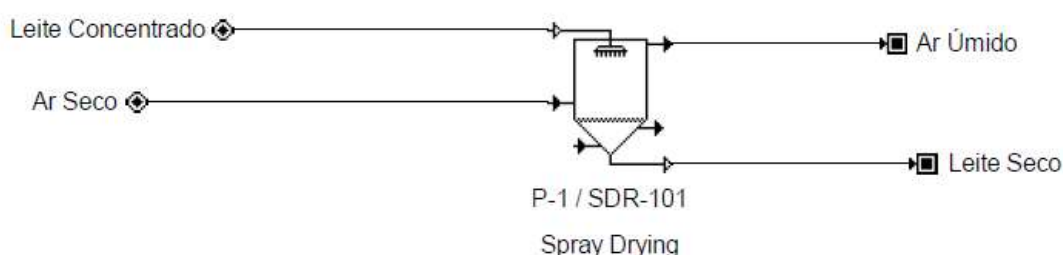
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Spray Dryer

4.1.2 Simulação do Equipamento no *SuperPro Designer*

A Figura 4 apresenta, de forma simplificada, o processo de secagem por atomização (*spray drying*) aplicado à produção de leite em pó. Nesse sistema, o leite concentrado é alimentado juntamente com uma corrente de ar seco aquecido no equipamento identificado como P-1/SDR-101. No interior do secador, o produto líquido é atomizado em pequenas gotículas, aumentando significativamente a área de contato com o ar quente e promovendo a rápida evaporação da água. Como resultado, obtém-se como correntes de saída o leite seco (produto em pó) e o ar úmido, que carrega a umidade removida durante o processo. O diagrama da Figura 5 representa as principais entradas e saídas do equipamento, servindo como base para a análise do processo e balanço de massa.

Figura 5 – Layout do processo de secagem do leite no *SuperPro Designer*



Nesta simulação, a alimentação do *spray dryer* apresenta uma composição caracterizada por aproximadamente 51,5% de água e 48,5% de sólidos totais, sendo estes majoritariamente constituídos por lactose, proteínas

e minerais, com uma fração mínima de gordura (Quadro 3). Esse perfil indica uma corrente já bastante concentrada, típica de materiais que passaram por uma etapa prévia de concentração como leite concentrado. Em processos de secagem por atomização, alimentações nessa faixa de sólidos são desejáveis por reduzirem a quantidade de água a ser removida, aumentando a eficiência energética do processo. Outro método adotado para facilitar a secagem foi a definição da temperatura de entrada dessa corrente no sistema em 72 °C, por meio de um pré-aquecimento a 1 bar.

Quadro 3 - Dados de entrada do *spray dryer*

Componente	Vazão (kg/batelada)	Fração mássica (%)	Concentração (g/L)
Gordura	0,00207	0,2066	2,04539
Lactose	0,25992	25,9921	257,32820
Minerais	0,03713	3,7132	36,76160
Proteína	0,18566	18,5658	183,80600
Água	0,51522	51,5223	510,08347

A corrente de ar de entrada do *spray dryer* apresenta vazão mássica total de 10,94 kg/batelada, operando à temperatura de 160 °C e pressão de aproximadamente 1 bar. Sua composição é predominantemente gasosa, sendo constituída majoritariamente por nitrogênio (73,16%) e oxigênio (22,21%), com baixo teor de umidade (4,63% em massa). A presença reduzida de água, correspondente a uma concentração de 0,0366 g/L, caracteriza o ar como adequadamente seco para a operação de secagem, favorecendo a remoção de umidade do produto e a eficiência do processo.

Já a corrente de saída do ar no spray corresponde ao ar úmido resultante do processo de secagem, apresentando vazão mássica total de 11,42 kg/batelada, à temperatura de 90 °C e pressão de 4 bar. Observa-se aumento significativo do teor de umidade em relação à corrente de entrada, com fração mássica de água de 8,71%, evidenciando a transferência de umidade do produto para a fase gasosa. A composição é majoritariamente formada por nitrogênio (70,03%) e oxigênio (21,26%) que podem ser considerados inertes no processo,

enquanto a concentração de vapor de água atinge 0,316 g/L, confirmando a efetividade do processo de evaporação durante a secagem.

Na corrente de saída do leite já seco, observa-se uma redução abrupta do teor de água para cerca de 5,3%, acompanhada do aumento da fração de sólidos para aproximadamente 94,7%. Com isso, os componentes sólidos tornam-se significativamente mais concentrados, com destaque para lactose e proteínas que passam a representar a maior parte da composição do produto.

Esse perfil é característico de pós obtidos por *spray dryer* em aplicações alimentícias, nos quais a umidade final normalmente se situa entre 3% e 6%, assegurando estabilidade do produto, maior vida útil e facilidade de armazenamento e transporte. De acordo com o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), o leite em pó integral deve apresentar no máximo 5% de umidade (Brasil, 2018). Assim, do ponto de vista da qualidade do produto final, o processo desenvolvido aproxima-se das especificações legais, sendo possível atingir plenamente o limite de umidade estabelecido por meio de uma adequação nas condições operacionais.

Quadro 4 - Dados de saída do *spray dryer*

Componente	Vazão (kg/batelada)	Fração mássica (%)	Concentração (g/L)
Gordura	0,00207	0,4036	4,027192
Lactose	0,25992	50,7763	506,6563
Minerais	0,03713	7,2538	72,3803
Proteína	0,18566	36,2688	361,8976
Água	0,02712	5,2974	52,85836

A comparação entre entrada e saída do leite evidencia a intensidade da operação de secagem. Considerando uma base de 1 kg de alimentação, a água presente na entrada é da ordem de 0,515 kg, enquanto no produto final restam aproximadamente 0,053 kg, o que implica na evaporação de cerca de 0,462 kg de água por quilograma de alimentação. Isso corresponde à remoção de aproximadamente 90% da água inicialmente presente, caracterizando uma secagem severa. Tal nível de evaporação exige não apenas uma elevada

disponibilidade de energia térmica, fornecida pelo ar quente, mas também uma elevada capacidade de transporte de vapor, associada à vazão de ar de secagem.

A análise termodinâmica da simulação indica que o ar de saída apresenta temperatura em torno de 75 °C, enquanto o ponto de orvalho calculado é superior (84,6 °C), caracterizando uma condição próxima ou acima da saturação, fisicamente indesejável em processos de secagem. Embora o balanço de massa esteja coerente e o modelo atinja a umidade final especificada, a capacidade do ar, nas condições atuais de temperatura e vazão, mostra-se insuficiente para transportar todo o vapor gerado pela evaporação. Assim, apesar de o *spray dryer* desempenhar adequadamente a concentração dos sólidos e a redução da umidade do produto, o sistema encontra-se limitado do ponto de vista energético e psicrométrico.

Como não foi possível ajustar a vazão de ar na simulação, esse parâmetro constitui um ponto de atenção para a operação na planta piloto. Isso sugere que no processo real, ainda que a temperatura esteja adequada para a secagem, será necessária uma maior vazão de ar aquecido para garantir uma operação fora do regime de saturação.

4.1.3 Testes Reais no *Spray Dryer*

Na secagem do leite, quando o pó não é transportado até o coletor e permanece aderido às paredes da câmara e das tubulações, o problema mais comum está relacionado à aderência do produto durante o processo. Isso ocorre quando as partículas não atingem um estado suficientemente seco antes de entrarem em contato com as superfícies internas do equipamento.

Em geral, a principal causa é uma combinação de temperatura inadequada, umidade elevada do produto, características da composição do leite e condições de escoamento do ar. Se a temperatura de saída do ar estiver baixa, o pó não perde umidade suficiente e permanece em estado parcialmente úmido, favorecendo a aderência às paredes. Mesmo quando a temperatura de entrada é alta, um valor de saída insuficiente indica que o processo de secagem não foi completo. Associado a isso, um teor de umidade final elevado no pó também contribui diretamente para a formação de depósitos, o que pode ocorrer por

vazão de alimentação excessiva, baixa eficiência térmica ou atomização ineficiente (bico injetor).

Outro fator importante é o escoamento do ar dentro da câmara e das tubulações. Se a vazão de ar for insuficiente ou se o padrão de escoamento não promover o adequado arraste das partículas, o pó tende a se depositar nas paredes, especialmente em curvas e regiões de mudança de direção do fluxo como no caso do equipamento em operação (Figura 1). Problemas de turbulência ou de projeto geométrico do sistema também podem favorecer impactos das partículas contra as superfícies.

A atomização inadequada é igualmente crítica. Quando o atomizador opera com pressão baixa, apresenta obstruções ou produz gotas muito grandes, essas gotas podem atingir as paredes antes de estarem secas, formando camadas aderidas. Além disso, superfícies internas frias podem causar condensação local de umidade, aumentando ainda mais a tendência de aderência, especialmente se houver resíduos de operações anteriores que sirvam como pontos de nucleação para novos depósitos.

Com base nessas informações, foram realizados diversos ensaios com o objetivo de determinar as condições ideais de operação do equipamento. Avaliaram-se os principais parâmetros de processo, incluindo vazão de alimentação, vazão de ar quente e temperatura de secagem. Conforme já indicado pelos resultados da simulação, verificou-se que a faixa de temperatura mais adequada para a operação situa-se entre 150 e 170 °C, entretanto, outras temperaturas foram testadas para além da simulação.

A partir dessa definição, procedeu-se variando a vazão de ar quente e a vazão de alimentação, mantendo-se constantes os demais parâmetros operacionais como a pressão do ar comprimido utilizado para a atomização do leite no bico de injeção que foi fixada em 4 bar e a concentração da alimentação que foi mantida em 50% (m/m) (ver Quadro 5).

Quadro 5 - Ensaios realizados no *spray dryer*

Ensaio	Vazão de ar quente (m³/h)	Vazão de alimentação (mL/min)	T(entrada) (°C)	T(saída) (°C)	Umidade do pó (%)	Observações
--------	------------------------------	----------------------------------	--------------------	------------------	----------------------	-------------

1	150	15	150	100-110	-	Secou, mas não foi para o coletor
2	180	15	150	100-110	-	Secou, mas não foi para o coletor
3	180	10	150	100-110	-	Secou, mas não foi para o coletor
4	120	10	160	120	-	Não coletado. Cheiro de caramelização
5	150	10	120	80	-	Não secou

Os ensaios realizados no *spray dryer* (Quadro 5) evidenciam três comportamentos distintos do processo de secagem do leite. Na condição de baixa temperatura de entrada (120 °C), não ocorre secagem adequada, resultando em um produto ainda úmido e sem coleta no ciclone. Em temperaturas intermediárias, entre 150 e 160 °C, observa-se que o material efetivamente seca, entretanto, o pó não é transportado até o coletor, permanecendo aderido às paredes da câmara (Figura 6a e 6b). Esse comportamento indica que o principal problema do processo não está apenas relacionado à remoção de umidade, mas à ocorrência de aderência, característica típica de matrizes ricas em lactose e gordura, nas quais as partículas, mesmo com baixo teor de água, permanecem quentes e pegajosas.

Por outro lado, quando se opera a 160 °C com vazão de ar reduzida, verifica-se a degradação térmica do produto, evidenciada pelo odor de caramelização, sem que haja coleta eficiente do pó. Assim, conclui-se que o sistema apresenta uma faixa operacional limitada: temperaturas baixas não promovem a secagem, temperaturas intermediárias promovem a secagem, porém com forte aderência às superfícies internas e temperaturas mais elevadas resultam em degradação do produto. Dessa forma, apenas o ajuste de temperatura, vazão de ar e vazão de alimentação não são suficientes para garantir uma operação eficaz.

O leite seco proveniente dos ensaios 1 e 2 foi removido por raspagem das tubulações e das paredes internas da câmara de secagem e posteriormente coletado (Figura 6c). Contudo, não foi realizada a análise do teor de umidade desses materiais, uma vez que se considerou que ainda não havia sido atingido um cenário operacional suficientemente otimizado para a secagem. Outro aspecto relevante observado durante os ensaios foi a predominante deposição do leite seco na tampa e na região superior do equipamento (Figura 6d). Esse comportamento pode estar associado a limitações de projeto e de construção do *spray dryer*.

O comprimento reduzido do bico injetor pode ter favorecido a permanência do leite seco na região superior da câmara, concentrando a deposição do material nessa área. Além disso, o formato da câmara de secagem pode induzir a formação de vórtices no escoamento do ar quente, promovendo a recirculação do material seco no interior do equipamento, em vez de seu direcionamento eficiente para os ciclones.

Figura 6 – Leite em pó em: a) nas tubulações e b) na câmara de secagem do equipamento. Em c), o leite em pó coletado da raspagem e d) depositado na tampa do spray.



a)



b)



c)



d)

A realização de novos ensaios foi limitada por diferentes fatores operacionais. Entre eles, destacam-se os problemas apresentados pela bomba peristáltica, as restrições de agenda do laboratório, uma vez que os experimentos concorriam com as aulas práticas da graduação realizadas no mesmo espaço, e a complexidade do processo de limpeza do equipamento que demandava um tempo significativo até que o sistema estivesse novamente seco para um novo teste. Além disso, cada ensaio exigia um período considerável para o condicionamento e a estabilização do *spray dryer* após qualquer alteração nos parâmetros operacionais, o que ampliava o tempo total necessário para a execução dos experimentos.

Diante dos resultados obtidos, concluiu-se que o cenário operacional mais favorável para a secagem do leite em *spray dryer* consiste na combinação de maior vazão de ar de secagem (220 a 300 m³/h), vazão de alimentação moderada (8 a 10 mL/min) e temperatura de entrada entre 150 e 160 °C. Essas condições asseguram que a temperatura de saída do produto permaneça na faixa de 100 a 110 °C, indicando a obtenção de um material adequadamente seco. Essa configuração tende a favorecer uma remoção de umidade mais eficiente, ao mesmo tempo em que reduz o tempo de residência térmica das partículas e a temperatura de contato com as paredes da câmara, minimizando o fenômeno de aderência característico de sistemas ricos em lactose. No entanto, essas condições ainda não foram testadas.

As intercorrências observadas durante a operação foram encaminhadas ao fabricante para ajustes e melhoria de performance do equipamento, a fim de

viabilizar testes em condições apropriadas e assegurar a qualidade do produto final.

4.2 Planta de Biodiesel

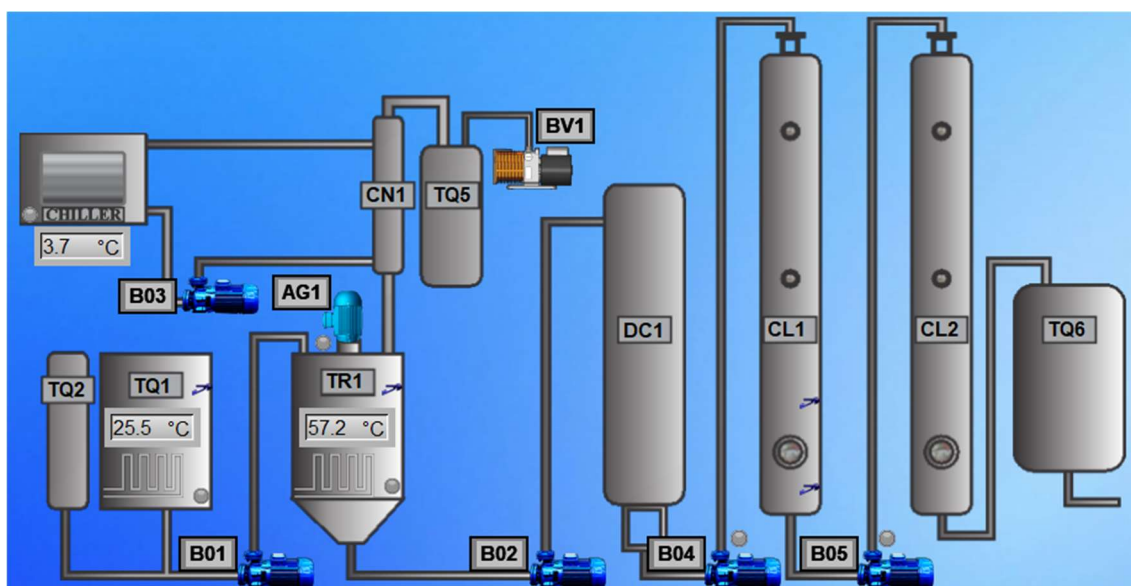
4.2.1 Planta Piloto de Produção de Biodiesel

O processo de produção de biodiesel da planta baseia-se na reação de transesterificação de óleos vegetais com metanol e metóxido de sódio em uma unidade com capacidade de 70 L/h (Figura 2). O objetivo é produzir biodiesel a partir de óleos vegetais, passando pelas etapas de preparo da matéria-prima, reação química, separação, purificação e armazenamento do produto final.

Inicialmente, o óleo vegetal utilizado como matéria-prima deve ser avaliado quanto à presença de impurezas, teor de umidade e índice de acidez. Caso o óleo apresente impurezas sólidas, estas devem ser removidas por filtração. Quando a acidez for inferior a 3 mg KOH/g e a umidade menor que 200 ppm, o óleo pode seguir diretamente para a etapa de transesterificação. Caso contrário, torna-se necessário um pré-tratamento.

O pré-tratamento do óleo consiste, quando necessário, nas etapas de neutralização e secagem. A neutralização é realizada por meio de uma reação de esterificação, utilizando metanol e ácido sulfúrico como catalisador, sob aquecimento e agitação no tanque de pré-tratamento (TQ1, Figura 7). Após a reação, ocorre uma etapa de decantação para separação das fases, acompanhada de uma lavagem com água quente para remoção de resíduos ácidos. Em seguida, o óleo passa por secagem térmica para retirada da umidade remanescente e após esse tratamento, o índice de acidez é novamente verificado para confirmar se o óleo está apto a seguir no processo. Essas etapas estão ilustradas de forma mais detalhada na Figura 7, na qual são apresentados todos os equipamentos que compõem as diferentes etapas do processo da planta piloto.

Figura 7 - Imagem ilustrativa da Unidade de Produção de Biodiesel



Na etapa de transesterificação, o óleo previamente tratado é transferido para o reator (TR1, ver Figura 7), onde é aquecido e mantido sob agitação. Em seguida, adiciona-se o metanol juntamente com o catalisador básico metóxido de sódio. Essa reação ocorre em temperaturas próximas de 60 a 65 °C e resulta na formação de biodiesel e glicerina bruta como subproduto. Terminada a reação, a mistura é encaminhada para um tanque de decantação (TC1), onde permanece em repouso por um período que pode variar de 1 a 24 horas. Durante esse tempo, ocorre a separação das fases: a glicerina, mais densa, se deposita no fundo, enquanto o biodiesel permanece na fase superior. A glicerina é então removida e armazenada separadamente (Figura 7).

No entanto, o biodiesel ainda contém metanol residual, que deve ser recuperado. Para isso, o produto é aquecido sob vácuo em um sistema de recuperação, permitindo a evaporação do metanol, que é posteriormente condensado (CN1) e armazenado para reutilização no processo (TQ5). Essa etapa contribui para a eficiência econômica e ambiental do sistema além da segurança por intoxicação. Depois da recuperação do metanol, o biodiesel passa por um processo de purificação em colunas contendo resinas de troca iônica. Nessas colunas são removidos contaminantes como sabões, traços de glicerina e metanol residual (CL1, CL2 da Figura 7). O escoamento do biodiesel ocorre de forma lenta, garantindo maior eficiência na remoção dessas impurezas. Por fim, depois de purificado, ele é transferido para o tanque de armazenamento final.

Amostras do produto são coletadas para análise e verificação de conformidade com as especificações estabelecidas pela ANP. Estando dentro dos padrões exigidos, o biodiesel encontra-se adequado para uso.

4.2.2 Simulação no *SuperPro Designer*

A simulação do processo de produção de biodiesel foi conduzida a partir da rota clássica de transesterificação alcalina do óleo de soja, catalisada por metóxido de sódio (NaOCH_3) em metanol. A reação global que descreve esse processo é representada de forma simplificada pela Equação (1):



Nessa reação, os triglicerídeos presentes no óleo de soja reagem com o metanol, na presença do catalisador alcalino, formando ésteres metílicos de ácidos graxos (biodiesel) e glicerina como coproduto. Todo o processo foi simulado com base no projeto da planta piloto disponível no Departamento de Engenharia Química, conforme ilustrado no PFD apresentado na Figura 8.

O Quadro 6 apresenta as vazões mássicas, composições em massa e concentrações das correntes de entrada e saída do processo de produção de biodiesel a partir do óleo de soja, obtidas por meio de simulação baseada no projeto da planta piloto do Departamento de Engenharia Química. O processo foi conduzido utilizando metanol como agente de transesterificação e metóxido de sódio (NaOCH_3) como catalisador alcalino.

Observa-se que a alimentação do sistema é composta predominantemente por óleo de soja (62,86 kg/batelada) e metanol (6,21 kg/batelada), complementada por uma corrente catalítica constituída por metanol (0,59 kg/batelada) e metóxido de sódio (NaOCH_3) (0,20 kg/batelada) (ver Quadro 6). Esses valores foram definidos com base na capacidade real de processamento da planta piloto, correspondente a 70 L de óleo de soja. Para a conversão da vazão volumétrica em vazão mássica, adotou-se a densidade do óleo de soja de 0,898 kg/L. A utilização de metanol em excesso é uma prática amplamente empregada em processos de transesterificação alcalina, uma vez que promove o deslocamento do equilíbrio químico da reação no sentido da

formação dos ésteres metílicos, contribuindo para o aumento da conversão do óleo e, conseqüentemente, do rendimento em biodiesel.

Quadro 6 - Valores de entrada e de saída de todos os componentes da envolvidos na simulação de produção de biodiesel

Tipo	Corrente	Substância	Vazão (kg/batelada)	Comp. Massa (%)	Concentração (g/L)
Entrada	Metanol Puro	Metanol	6,21	100,00	789,61
Entrada	Óleo de Soja	Óleo de soja	62,86	100,00	898,80
Entrada	Catalisador	Metanol	0,59	75,00	694,13
Entrada	Catalisador	NaOCH ₃	0,20	25,00	231,38
Saída	Fase Leve	Biodiesel	56,83	89,86	787,26
Saída	Fase Leve	Glicerina	0,01	0,01	0,13
Saída	Fase Leve	Metanol	0,13	0,20	1,75
Saída	Fase Leve	NaOCH ₃	0,00	0,00	0,00
Saída	Fase Leve	Óleo de soja	6,28	9,93	87,00
Saída	Fase Pesada	Biodiesel	0,01	0,14	1,66
Saída	Fase Pesada	Glicerina	3,55	86,96	1036,07
Saída	Fase Pesada	Metanol	0,40	9,82	117,04
Saída	Fase Pesada	NaOCH ₃	0,12	2,92	34,78
Saída	Fase Pesada	Óleo de soja	0,01	0,15	1,83

A análise das correntes de saída indica que a maior parte do biodiesel produzido se encontra corretamente concentrada na fase leve, com uma vazão de 56,83 kg/batelada e composição mássica de 89,86%. Esse resultado evidencia uma conversão significativa do óleo de soja em ésteres metílicos, característica desejável em processos industriais de biodiesel. A presença residual de óleo de soja na fase leve (9,93%) indica que a conversão não foi completa, o que é esperado em sistemas reais, especialmente em processos contínuos ou em batelada com tempo de residência limitado (ver Quadro 6).

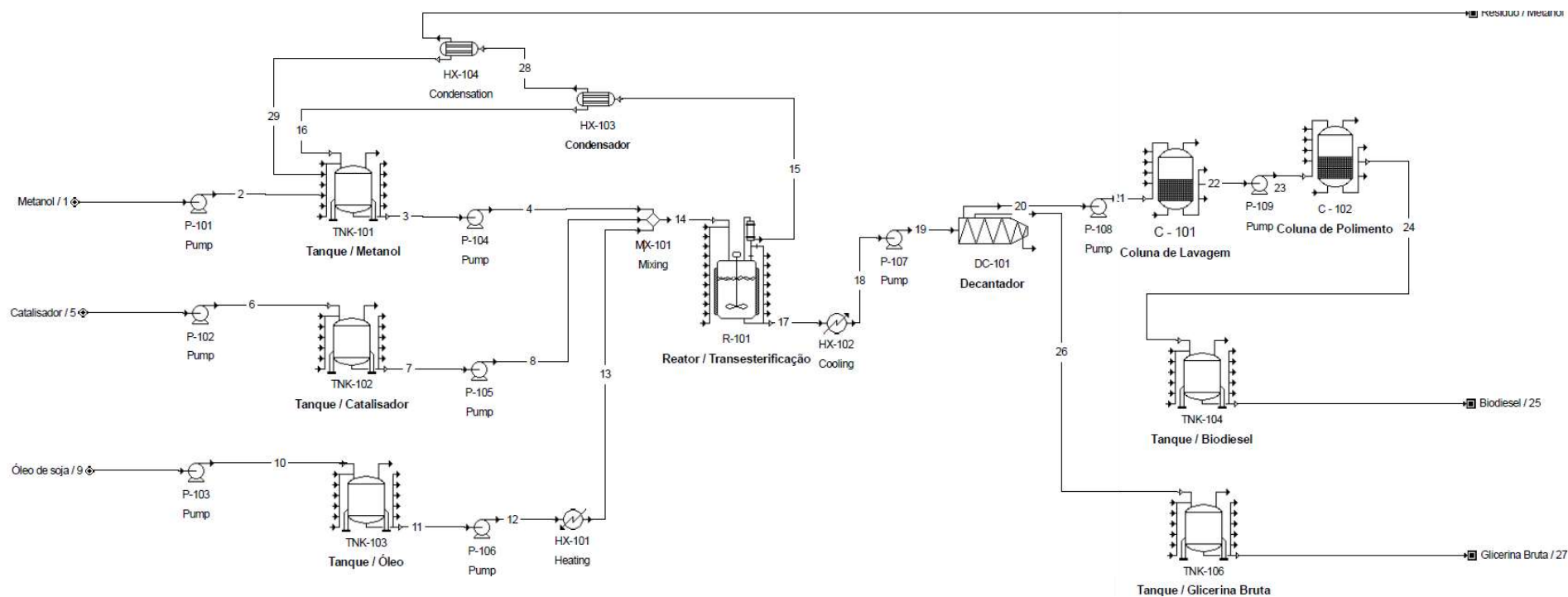
A fase pesada, por sua vez, apresenta elevada concentração de glicerina (86,96%), com vazão de 3,55 kg/batelada, confirmando a eficiência da separação gravimétrica entre biodiesel e glicerol. A presença majoritária da glicerina nessa fase está de acordo com sua maior densidade e polaridade quando comparada aos ésteres metílicos. Pequenas quantidades de biodiesel (0,14%) e óleo de soja (0,15%) também são observadas nessa fase, o que pode ser atribuído à solubilidade parcial desses compostos e a limitações inerentes à etapa de separação (ver Quadro 6).

O metanol residual distribui-se predominantemente na fase pesada (9,82%), enquanto apenas uma fração reduzida permanece na fase leve (0,20%). Esse comportamento é coerente com a afinidade do metanol pela fase rica em glicerina, sendo um aspecto relevante para o projeto das etapas subsequentes de recuperação e reciclo do álcool. O catalisador NaOCH_3 também se concentra majoritariamente na fase pesada (2,92%), o que é esperado devido à sua natureza iônica e maior solubilidade em meios polares.

Após a separação das fases, o biodiesel bruto segue para etapas de lavagem e polimento, destinadas à remoção de impurezas residuais como traços de glicerina e metanol, assegurando que o produto final atenda às especificações de qualidade exigidas pelas normas vigentes. No entanto, o teor de ésteres obtido ainda se encontra abaixo do mínimo estabelecido por regulamentações como a ANP (2023), que exigem valores superiores a 96,5%, indicando a necessidade de otimização das condições reacionais, tais como aumento da razão molar metanol/óleo, ajuste da temperatura ou ampliação do tempo de residência no reator. Esses parâmetros podem ser facilmente modificados e testados no simulador.

O balanço de massa global do processo de produção de biodiesel, realizado a partir dos dados de simulação em batelada, apresentou fechamento completo, com 69,86 kg/batelada tanto na entrada quanto na saída do sistema. Esse resultado confirma a consistência do modelo e o atendimento à lei da conservação da massa, permitindo a avaliação confiável do processo de transesterificação e da separação de fases. Esses resultados reforçam a viabilidade do processo proposto e fornecem subsídios técnicos importantes para análises futuras de otimização e escalonamento.

Figura 8 – PFD do processo de produção de biodiesel desenvolvido com base no projeto da planta piloto localizada no Departamento de Engenharia Química



4.2.3 Testes com Azeite Adulterado

O Departamento de Engenharia Química recebeu algumas unidades de azeite adulterado apreendidas em uma operação da Polícia Federal, com a proposta de reaproveitar o material como fonte de triglicerídeos para a produção de biodiesel. O produto em questão é o azeite de oliva Valle Viejo (Figura 9), de origem argentina, cuja comercialização está proibida no Brasil desde 2021 por determinação da Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA) e do Ministério da Agricultura e Pecuária (MAPA).

Figura 9 - Galão de 5 litros do azeite de oliva “Valle Viejo - Extra Virgem”, produto de origem argentina cuja comercialização foi proibida no Brasil após constatação de adulteração, sendo alvo de apreensões por órgãos de fiscalização.



Investigações oficiais constataram que o produto não se trata de azeite extravirgem puro, mas sim de uma mistura fraudulenta de óleos vegetais, como soja e girassol sendo, portanto, impróprio para consumo humano. Laudos técnicos indicaram níveis de acidez superiores a 5%, valor muito acima do limite máximo de 0,8% permitido para azeites extravirgens, evidenciando a adulteração (Polícia Federal, 2023).

Foi realizado um teste experimental utilizando esse material, simulando as mesmas condições operacionais da reação de transesterificação empregadas na produção de biodiesel na planta piloto, partindo de 50 mL de óleo. Observou-se que não houve formação de biodiesel, em vez disso, ocorreu predominantemente a reação de saponificação, resultando na formação de sabão (Figura 10).

Figura 10 - Ensaio de tentativa de produção de biodiesel a partir do azeite adulterado, nas mesmas condições de transesterificação da planta piloto. Observa-se a ocorrência predominante de reação de saponificação, com formação de sabão, em detrimento da formação de ésteres (biodiesel).



Diante do resultado obtido, decidiu-se investigar as possíveis causas de a reação de saponificação ter ocorrido de forma preferencial em relação à transesterificação. Para verificar essa hipótese, foi realizada a titulação determinando-se um índice de acidez de 2,75 mg KOH/g de azeite, correspondente a aproximadamente 1,38% de ácidos graxos livres, expressos

como ácido oleico. O resultado confirmou que o nível de acidez estava acima do esperado para um azeite de oliva de boa qualidade.

Entretanto, esse valor, isoladamente, ainda não justificava a não ocorrência da transesterificação, uma vez que, conforme as diretrizes operacionais da planta piloto, óleos com índice de acidez inferior a 3,00 mg KOH/g óleo não necessitam de pré-tratamento (esterificação ácida seguida de transesterificação básica). Assim, tornou-se necessário considerar outros fatores que possam ter favorecido a saponificação em detrimento da formação de ésteres.

Outra hipótese considerada foi a de que o teor de umidade presente no óleo estivesse elevado. De acordo com Anantapinitwatana *et al.* (2021), a presença de água em sistemas de transesterificação catalisados por bases compromete a atividade catalítica e favorece reações paralelas, como a hidrólise dos triglicerídeos, com consequente formação de ácidos graxos livres e posterior saponificação. Assim, a possível presença de água no azeite adulterado pode ter contribuído para a predominância da reação de saponificação em detrimento da formação de ésteres metílicos (biodiesel).

Entretanto, essa hipótese não pôde ser verificada experimentalmente no momento do ensaio, uma vez que os esforços estavam concentrados na operação e estabilização da planta piloto. A investigação do teor de umidade e sua influência no desempenho reacional será retomada em etapa posterior do estudo.

4.3 Problemas nas Plantas

Um dos principais fatores que impediram o avanço do projeto foi o mau funcionamento dos equipamentos, decorrente de falhas em componentes específicos das plantas pilotos. A assistência técnica responsável pela manutenção, localizada em outro estado, demonstrou baixo comprometimento na realização dos reparos, o que resultou em atrasos significativos na correção das avarias.

No início do projeto, apenas a planta piloto de biodiesel havia sido testada pelo fabricante e encontrava-se, a princípio, operante. Entretanto, o sistema de resfriamento apresentou problemas de vazamento do gás no *chiller* pouco tempo

após o início das atividades, o que levou à paralisação da planta e à necessidade de aguardar a manutenção especializada.

Nesse mesmo período, o *spray dryer* também permaneceu inoperante em razão da retirada de um de seus componentes para usinagem (copo coletor). As plantas pilotos de cerveja e etanol, por sua vez, foram testadas pelo fabricante apenas em agosto de 2025 e igualmente apresentaram problemas no sistema de resfriamento. Diante desse cenário, durante o intervalo em que os equipamentos permaneceram indisponíveis, os esforços do projeto concentraram-se no desenvolvimento da parte escrita, incluindo a elaboração dos roteiros experimentais, dos questionários e da realização de simulações dos processos no *SuperPro Designer*.

Após o reparo do componente do *spray dryer*, os testes experimentais puderam ser iniciados. Contudo, pouco tempo depois, a bomba peristáltica apresentou falhas, exigindo nova interrupção dos ensaios e o envio da peça para reparo na fábrica da empresa responsável. Observou-se que a bomba ocasionava a torção da mangueira de alimentação, gerando vazamentos frequentes, além de apresentar desprendimento de parafusos em decorrência das vibrações geradas durante a operação (Figura 11).

Até o momento da elaboração deste relatório, a empresa fornecedora ainda não havia realizado os reparos necessários nas plantas piloto, que permaneceram desligadas. A falta de suporte técnico adequado por parte da empresa gerou desgaste e preocupação entre os docentes responsáveis pelo Departamento de Engenharia Química, uma vez que esses equipamentos, além de integrarem o projeto, estão previstos para utilização em aulas práticas de Operações Unitárias no próximo ano letivo e, atualmente, não se encontram em condições adequadas de operação.

Figura 11 - A bomba peristáltica do *spray dryer* que apresentou falhas de funcionamento incluindo o rompimento da mangueira de alimentação durante a operação



5. PARTICIPAÇÃO EM EVENTOS CIENTÍFICOS

Durante a execução do projeto, o pós-doutorando apresentou o trabalho intitulado "Uso de Plantas Piloto como Estratégia Pedagógica Inovadora no Ensino Técnico e Superior" no formato de pôster durante o 25º Congresso Brasileiro de Engenharia Química (COBEQ) e o 20º Encontro Brasileiro sobre o Ensino em Engenharia Química (ENBEQ), ocorridos entre 6 e 10 de outubro de 2025 em Belo Horizonte-MG e também participou como avaliador da 1ª fase do XXXVII Congresso de Iniciação Científica (CIC) da UNESP, realizado nos dias 25 e 26 de setembro de 2025, no Instituto de Química de Araraquara.

6. ORIENTAÇÕES

Não houve orientação de alunos neste projeto. Por se tratar de um estudo inicial, no qual as plantas estavam sendo testadas pela primeira vez, não foi possível incluir discentes na execução das atividades. Contudo, o projeto apresenta caráter promissor e potencial para desdobramentos extensionistas futuros, nos quais haverá demanda para a participação de estudantes colaboradores.

7. AÇÕES EXTENSIONISTAS

Não foram realizadas ações extensionistas porque o projeto encontrava-se em fase inicial e exploratória, com as plantas sendo testadas pela primeira vez. Nesse momento, foi necessário concentrar esforços na padronização dos métodos, controle das variáveis e validação dos resultados, o que limitou a ampliação para atividades junto à comunidade. Contudo, após a consolidação dessa etapa, há potencial para o desenvolvimento de ações extensionistas futuras.

8. DISCIPLINAS MINISTRADAS

Não houve disciplinas ministradas no âmbito deste projeto, pois ele se encontrava em fase inicial e exploratória, exigindo dedicação integral à estruturação metodológica, condução dos experimentos e validação dos resultados. Dessa forma, as atividades concentraram-se exclusivamente na consolidação científica do estudo, não havendo atuação docente vinculada ao período de execução.

9. APROVAÇÃO DO COMITÊ DE ÉTICA

O atraso na execução integral do projeto não esteve relacionado exclusivamente à falta de operacionalidade das plantas piloto. Ao longo do período de aproximadamente um ano, também não foi possível avançar para a etapa de visita das plantas pelos alunos. O projeto foi apresentado à turma do 2º ano do curso Técnico em Química Integrado ao Ensino Médio do IFSP, cujos alunos assinaram uma lista de intenção de participação na pesquisa. Entretanto, esses estudantes não chegaram a participar da etapa prática de interação com as plantas piloto.

Esse atraso ocorreu, principalmente, em razão do desconhecimento inicial de que o projeto deveria ser submetido à Plataforma Brasil e aprovado pelo Comitê de Ética em Pesquisa (CEP), uma vez que envolvia a interação com seres humanos, incluindo participantes menores de idade. Inicialmente, o projeto foi submetido à Comissão Permanente de Pesquisa (CPP) do Instituto de Química em 25/03/2025, tendo seu primeiro parecer emitido em 22/05/2025. A partir desse parecer, identificou-se a necessidade de submissão do projeto à Plataforma Brasil.

A submissão à Plataforma Brasil ocorreu em 28/05/2025, sob o CAAE (Certificado de Apresentação para Apreciação Ética) nº 89095525.6.0000.5426. Durante o processo de avaliação, o projeto recebeu quatro pareceres com solicitações de adequação, sendo o último emitido em 21/01/2026, o qual exigiu ajustes no cronograma em função do atraso acumulado, considerando que as atividades não poderiam ser executadas sem a aprovação prévia do CEP. Até a data de submissão deste relatório, o projeto ainda não havia sido aprovado interinamente.

10. ETAPAS FUTURAS

A partir do segundo semestre de 2026, espera-se que as plantas piloto estejam em pleno funcionamento e termos a aprovação pelo CEP. Nesse período, a disciplina Laboratório de Engenharia Química III utilizará essas unidades, o que configura uma oportunidade estratégica para avançar na obtenção de dados mais robustos e consistentes do projeto, aplicar as metodologias propostas e alcançar resultados mais tangíveis e mensuráveis. Nesse contexto, daremos continuidade ao projeto, reconhecendo sua relevância para a formação integral dos estudantes e para o fortalecimento da aprendizagem prática e aplicada.

11. COMENTÁRIOS DO SUPERVISOR

Ao longo do período de execução do projeto, o pós-doutorando demonstrou comprometimento, organização e postura proativa diante dos desafios enfrentados. Embora tenham ocorrido adversidades relevantes, especialmente relacionadas à indisponibilidade e ao funcionamento intermitente dos equipamentos, além de entraves operacionais e burocráticos (manutenção técnica, logística de laboratório e trâmites éticos), foi possível manter a continuidade do trabalho por meio de estratégias alternativas e bem planejadas.

Mesmo com limitações para a realização de ensaios em escala piloto no cronograma inicialmente previsto, houve avanço consistente na estruturação técnico-científica do projeto, com o desenvolvimento de materiais de apoio, roteiros experimentais, instrumentos de avaliação, simulações de processos e sistematização dos principais pontos críticos observados nas plantas piloto. Destaca-se também a condução responsável dos testes realizados e o

encaminhamento das intercorrências aos responsáveis técnicos, visando a melhoria da performance dos equipamentos e a viabilização das etapas subsequentes.

De forma geral, avalio que o projeto evoluiu de maneira sólida dentro das condições disponíveis, consolidando bases metodológicas e técnicas essenciais para a próxima fase. Com a expectativa de pleno funcionamento das plantas piloto e regularização da etapa ética, o segundo semestre de 2026 representa um momento estratégico para intensificar a obtenção de dados experimentais, implementar integralmente as intervenções pedagógicas planejadas e alcançar resultados mais tangíveis, reforçando a relevância do projeto para a formação prática e aplicada dos estudantes.

12. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALCÂNTARA, P. R.; SIQUEIRA, L. M. M.; VALASKI, Suzana. Vivenciando a aprendizagem colaborativa em sala de aula: experiências no ensino superior. **Revista Diálogo Educacional**, v. 4, n. 12, p. 169-188, 2004.

ANP (Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural E Biocombustíveis). Resolução n.º 920, de 28 de dezembro de 2023: estabelece a especificação do biodiesel e as obrigações quanto ao controle da qualidade a serem atendidas pelos agentes econômicos que comercializem o produto em território nacional. Disponível em: <https://atosoficiais.com.br/anp/resolucao-n-920-2023-estabelece-a-especificacao-do-biodiesel-e-as-obrigacoes-quanto-ao-controle-da-qualidade-a-serem-atendidas-pelos-agentes-economicos-que-comercializem-o-produto-em-territorio-nacional?origin=instituicao&q=920/2023>. Acesso em: 25 de janeiro de 2026.

ANANTAPINITWATANA, A; NGAOSUWAN, K.; KIATKITTIPONG, W.; WONGSAWENDENG, D.; ANONTPINIJWTANA, A.; QUTAIN, A. T.; ASSABUMRUNGRAT, S. Water influence on the kinetics of transesterification using CaO catalyst to produce biodiesel. *Fuel*, v. 296, 120653, 2021.

BORDIGNON, L. H. C.; TREVISOL, M. T. C. Ensino, aprendizagem, práticas pedagógicas e inovação educacional: tecendo diálogos. **Revista de Educação PUC-Campinas**, v. 27, p. 1-15, 2022.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Instrução Normativa nº 53, de 1º de outubro de 2018. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 2 out. 2018. Disponível em: <https://www.in.gov.br/>. Acesso em: 12 jan. 2026.

CLEOPHAS, M. G.; CAVALCANTI, E. L. D. ESCAPE ROOM no Ensino da Química. **Química Nova na Escola**, v. 42, n. 1, p. 45-55, 2020.

DOMINGUES, L. F. Teoria e Prática na Formação Profissional do Técnico em Química. **Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento**. Ano 3, Ed. 5, v. 3, p. 116-130, 2018.

LUCKESI, C. C. **Avaliação da aprendizagem escolar**: estudo e proposições. São Paulo: Cortez, 2013.

MATSUMOTO, L. T. J.; KUWABARA, I. H. A formação profissional do técnico em química: Caracterização das origens e necessidades atuais. **Química Nova na Escola**, v. 28, n. 2, p. 350-359, 2005.

POLÍCIA FEDERAL. *Em operação, PF retira diversas embalagens de azeite impróprias para consumo*. Gov.br, 23 maio 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/pf/pt-br/assuntos/noticias/2023/05/em-operacao-pf-retira-diversas-embalagens-de-azeite-improprias-para-consumo>. Acesso em: 22 fev. 2026.

RICOURTE, M. VILORIA, A. Project-based learning as a strategy for multi-level training applied to undergraduate engineering students. **Education for Chemical Engineers**, v. 33, p. 102-111, 2020.

SANTOS, F. R.; OLIVEIRA, I. M.; SANTOS, L. C.; LEAL, R. E. G.; CARDOSO, M. Pedagogical strategies for Chemical Engineering courses: Skills development through Project-based learning (PBL). **Research, Society and Development**, v. 10, n. 7, 2021.

VILLAS BOAS, B. Funções da avaliação: formativa, diagnóstica e somativa. In: VILLAS BOAS, B; SOARES, E. R. M. (Org.). **Avaliação das aprendizagens, para as aprendizagens e como aprendizagem: obra pedagógica do professor**. Campinas: Papirus, 2022.

ANEXO I

Questionário Elaborado para Aplicação Pós e Pré-Intervenção

Equipamento: Spray Dryer

SPRAY DRYER - FORMULÁRIO 1

O *spray dryer*, ou secador por atomização, é um equipamento utilizado para transformar soluções, suspensões ou emulsões em pós secos. O processo ocorre por meio da atomização do líquido em pequenas gotas, que entram em contato com uma corrente de ar quente, promovendo a evaporação rápida do solvente e resultando na formação de partículas sólidas. Essa técnica é muito empregada nas indústrias química, farmacêutica e de alimentos, devido à sua eficiência e à possibilidade de controlar o tamanho das partículas obtidas. **Antes de realizarmos as atividades práticas, este questionário tem como objetivo avaliar os conhecimentos prévios sobre o funcionamento e a operação de um *spray dryer*.**

1. Quais são as principais etapas do processo em um *spray dryer*?

- () Mistura, agitação e filtração.
- () Atomização, contato com ar aquecido e coleta de partículas secas.
- () Destilação, condensação e decantação.
- () Resfriamento, congelamento e moagem.

2. O que controla o tamanho das partículas formadas no *spray dryer*?

- () A cor do líquido alimentado.
- () A pressão, o tipo de atomizador e a vazão da alimentação.
- () Apenas a temperatura ambiente do laboratório.
- () O tempo de armazenamento do pó.

3. O que ocorre com a gota de líquido ao entrar em contato com a corrente de ar quente no *spray dryer*?

- () Ela aumenta de volume e condensa.
- () Ela evapora rapidamente, formando partículas sólidas.
- () Ela permanece líquida até o final do processo.
- () Ela congela devido à pressão.

4. Qual é o princípio básico de funcionamento do *spray dryer*?

- () Evaporação lenta em estufa.
- () Secagem por contato direto com chama.
- () Atomização de líquido em gotas e secagem rápida com ar quente.
- () Congelamento e sublimação.

5. O que é um *spray dryer*?

- () Um equipamento para separar misturas sólidas.
- () Um equipamento para secagem rápida de soluções ou suspensões.
- () Um tipo de destilador a vácuo.
- () Um agitador mecânico de alta rotação.

6. Quais são os principais componentes de um *spray dryer*?

- () Bico atomizador, câmara de secagem, sistema de aquecimento, ciclone/coletor.
- () Reator, condensador e coluna de destilação.
- () Filtro de areia e agitador mecânico.

() Prensa hidráulica e trocador de calor de placas.

ANEXO II

Procedimento Operacional Padrão (POP)

Equipamento: Spray Dryer

OPERAÇÃO DO SPRAY DRYER – PRODUÇÃO DE LEITE EM PÓ

Objetivo: Estabelecer o procedimento padrão para a operação segura e correta do spray dryer, garantindo a reprodutibilidade do processo de secagem, a integridade do equipamento e a produção de leite em pó.

Campo de Aplicação: Aplicável às operações de secagem por atomização realizadas em laboratório, utilizando o *spray dryer* com sistema de aquecimento elétrico, soprador de ar, bomba peristáltica e ciclones separadores (Figura 1).

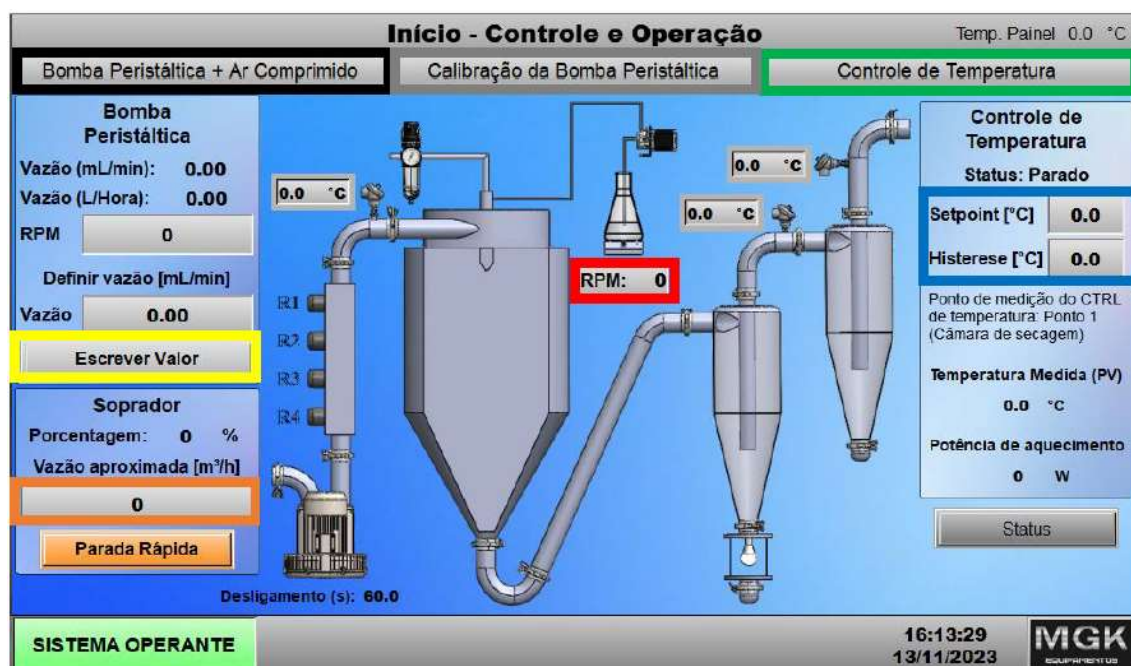
ROTEIRO PRÁTICO

1. Preparação e Habilitação do Sistema

1. Ligar o equipamento no painel de controle.
2. Aguardar a inicialização completa da interface (painel da Figura 1).
3. Na tela inicial, clicar em **HABILITAR SISTEMA** e confirmar o status **SISTEMA OPERANTE** (indicação em verde).
4. Verificar se a câmara de secagem, ciclones e conexões estão limpos, secos e corretamente montados.

Observação: para iniciar o procedimento, a amostra de leite integral deve estar previamente concentrada. A concentração pode ser realizada em estufa com circulação de ar a 60 - 70 °C, utilizando uma camada fina e monitorando a massa até atingir a concentração desejada de sólidos de 30%. Realizar agitação intermitente para evitar formação de película e separação de gordura. Interromper o processo quando a amostra apresentar viscosidade homogênea e bombeável. Resfriar à temperatura ambiente e homogeneizar antes da alimentação no spray dryer. A concentração prévia reduz a carga térmica do equipamento, melhora o rendimento e diminui a aderência de gordura na câmara de secagem.

Figura 1 - Tela de controle dos ajustes dos parâmetros operacionais apresentando cada componente do equipamento



2. Ajuste dos Parâmetros Operacionais

2.1 Preparação e Agitação da Amostra (Leite Integral Concentrado)

1. Garantir que o leite integral concentrado esteja homogêneo e livre de grumos.
2. Ajustar a rotação do agitador magnético entre 100 e 300 rpm, evitando separação de gordura clicando no quadro vermelho da Figura 1.
3. Manter agitação contínua durante toda a operação. Para ativar, basta clicar no ícone logo acima do quadro vermelho (Erlenmeyer com agitador).

2.2 Alimentação da Amostra - Bomba Peristáltica

1. Clique no ícone marcado com o quadro amarelo da Figura 1 e ajustar vazão entre 10 e 15 mL/min.
2. Iniciar com vazões menores, aumentando gradualmente conforme a estabilidade do processo.

2.3 Vazão de Ar de Secagem

- Clicar no quadro laranja da Figura 1 e ajustar a vazão do soprador entre **120 e 160 m³/h**.

2.4 Controle de Temperatura

1. Definir no quadro azul da Figura 1:
 - a. Temperatura de entrada do ar: 150 a 160°C
 - b. Histerese: **até 15 °C**
2. Monitorar a temperatura de saída: **(100 a 110 °C)**.

Atenção: Após a estabilização das temperaturas de entrada e saída, iniciar o procedimento com a injeção de água destilada na alimentação. Aguardar nova estabilização das temperaturas e somente então iniciar a injeção do leite integral concentrado. Essa etapa garante maior estabilidade térmica do sistema e reduz riscos de incrustação inicial na câmara de secagem.

3. Calibração da Bomba Peristáltica

1. Clique no quadro cinza da Figura 1.
2. Posicionar a mangueira de sucção na amostra concentrada.
3. Direcionar a mangueira de saída para uma proveta.
4. Acionar a função Injetar Solução cinco vezes.
5. Registrar o volume médio obtido.
6. Repetir até completar os três campos de calibração.
7. Retornar à tela inicial.

4. Início da Operação

1. Ajustar a pressão do ar comprimido para 4 bar diretamente na válvula de saída de ar para o equipamento.
2. Ligar o agitador magnético clicando no ícone da tela.
3. Ligar o soprador de ar clicando no ícone da tela.

4. Ligar manualmente as resistências elétricas, confirmando vazão de ar > 20%.
5. Aguardar o sistema atingir a temperatura de operação.
6. Ligar a bomba peristáltica e iniciar a alimentação do leite integral concentrado.
7. Monitorar continuamente o processo.
8. Clique no ícone da lâmpada do coletor para observar o pó formado sendo coletado.
9. De vez em quando, é recomendável aumentar a vazão do soprador para uns 80% da capacidade por alguns segundos com o intuito de empurrar as partículas de leite sólido para o coletor. Lembrar de retornar à configuração anterior novamente.

5. Finalização da Operação

1. Desligar a bomba peristáltica.
2. Manter o soprador e aquecimento por alguns minutos para secagem residual.
3. Desligar o aquecimento e o soprador.
4. Aguardar o resfriamento da câmara.
5. Coletar o leite integral em pó nos coletores abaixo dos ciclones.

6. Limpeza e Higienização

1. Desligar os disjuntores do equipamento.
2. Desmontar os componentes removíveis.
3. Lavar com água, detergente neutro e material antiabrasivo.
4. Remover cuidadosamente resíduos lipídicos.
5. Secar completamente e montar o equipamento.
6. Evitar molhar componentes eletrônicos / elétricos.

7. Teste de Qualidade: determinação da umidade no leite em pó

A porcentagem de umidade do leite em pó por estufa é determinada por perda de massa após secagem, seguindo um procedimento gravimétrico simples e amplamente utilizado em análises de alimentos. A amostra é aquecida em estufa a 102-105 °C, removendo a água. A diferença de massa antes e depois da secagem corresponde ao teor de umidade.

7.1 Materiais necessários

1. Estufa com controle de temperatura (100–105 °C);
2. Cápsula de porcelana ou alumínio;
3. Balança analítica ($\pm 0,001$ g);
4. Dessecador com sílica gel;
5. Pinça;
6. Leite em pó recém secado (amostra);

7.2 Procedimento experimental

7.2.1 Secagem da cápsula

1. Leve a cápsula vazia à estufa (102–105 °C) por 30 minutos.
2. Resfrie em dessecador (20 min).
3. Pese e anote a massa $\rightarrow m_0$.

7.2.2 Pesagem da amostra

1. Adicione cerca de 2 a 5 g de leite em pó na cápsula.
2. Pese $\rightarrow m_1$ (cápsula + amostra).

7.2.3 Secagem da amostra

1. Leve à estufa a 100-105 °C por 3 horas.
2. Retire, resfrie no dessecador (20–30 min).
3. Pese $\rightarrow m_2$.

7.2.4 Secagem até massa constante (opcional, recomendado)

1. Retorne à estufa por mais 30 minutos.
2. Repita o ciclo até variação < 0,001 g.

7.3 Cálculo da umidade (%)

$$\text{Umidade (\%)} = \frac{(m_1 - m_2)}{(m_1 - m_0)} \times 100$$

Em que: m_0 = massa da cápsula vazia (g), m_1 = massa da cápsula + amostra antes da secagem (g), m_2 = massa da cápsula + amostra após secagem (g)

7.4 Cuidados importantes

- Sempre usar dessecador antes da pesagem.
- Não ultrapassar 105 °C (evita degradação da lactose).
- Leite em pó geralmente apresenta 2–5 % de umidade (valores maiores indicam problemas de secagem ou armazenamento).

ANEXO III

Procedimento Operacional Padrão (POP)

Equipamento: Planta Piloto de Produção de Biodiesel

PROCESSO DE PRODUÇÃO DE BIODIESEL VIA TRANSESTERIFICAÇÃO DO ÓLEO DE SOJA

Objetivo: produção de Biodiesel a partir da transesterificação de óleos vegetais e metanol na presença do catalisador metilato de sódio.

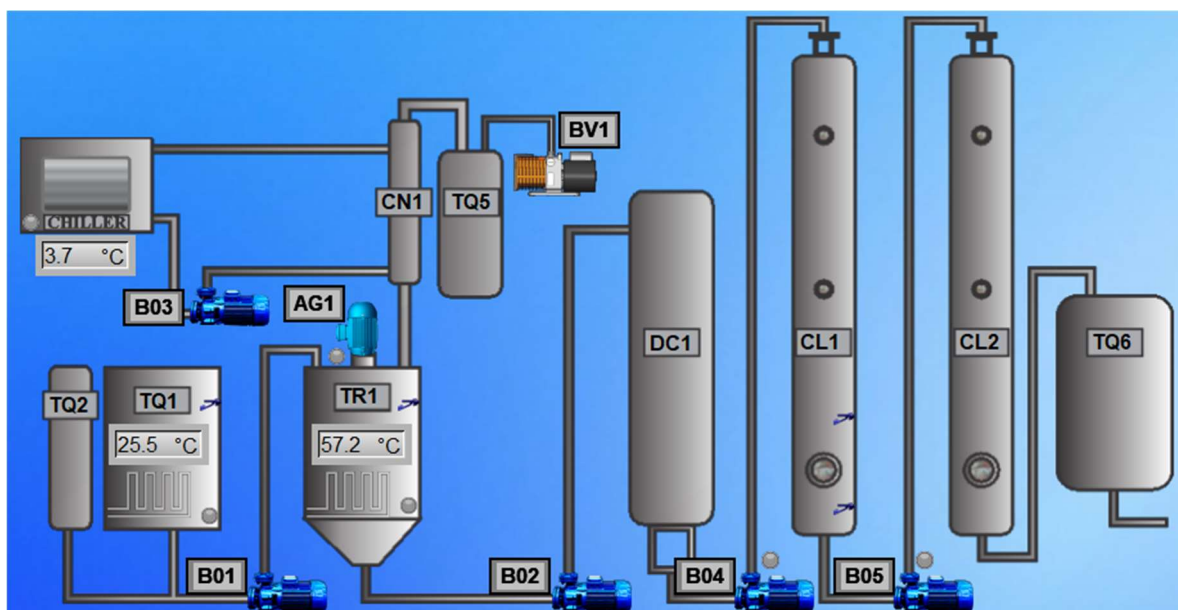
Aplicação: este POP aplica-se a interação didática dos alunos no processo produtivo de Biodiesel.

ROTEIRO PRÁTICO

1. Identificação dos componentes da Unidade de Produção de Biodiesel

A unidade de produção de biodiesel, apresentada na figura 1, é composto por: tanque de pré-aquecimento TQ1, tanque de álcool TQ2, tanque de catalisador TQ3, reator de transesterificação e recuperação de álcool RT1, decantador DC1, tanque de glicerina bruta TQ4, coluna de lavagem CL1, coluna de polimento CL2, tanque de álcool recuperado TQ5, tanque de biodiesel TQ6, condensador de álcool CN1, condensador de refluxo CN2, coluna de vácuo AR1, bombas de transferência B, bomba de vácuo BV, sistema de resfriamento (P) e painel de controle IHM.

Figura 1 - Imagem ilustrativa da Unidade de Produção de Biodiesel

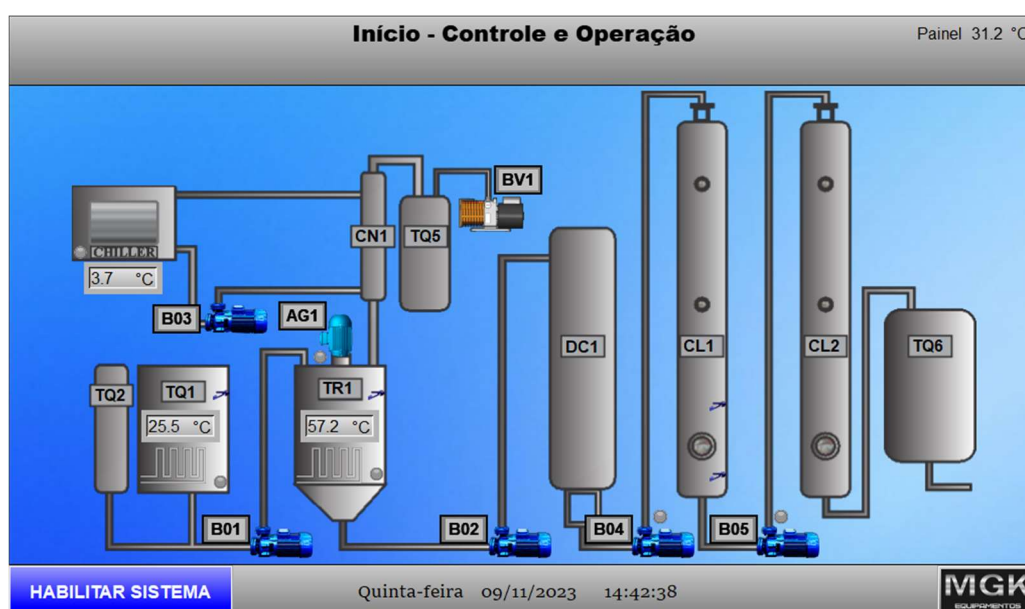


Com os componentes devidamente identificados, o próximo passo é energizar e preparar o sistema para a operação.

2. Acionamento da Unidade Experimental

- Localize e acione o botão liga/desliga no painel de controle principal da unidade.
- Aguarde alguns instantes para que a tela de controle, ou Interface Homem-Máquina (IHM), seja completamente carregada.
- Na tela inicial, clique na tecla "HABILITAR SISTEMA" como aparece na Figura 2. O status visual na tela mudará para "SISTEMA OPERANTE", indicando que a unidade está pronta para receber os comandos de operação (Figura 3).

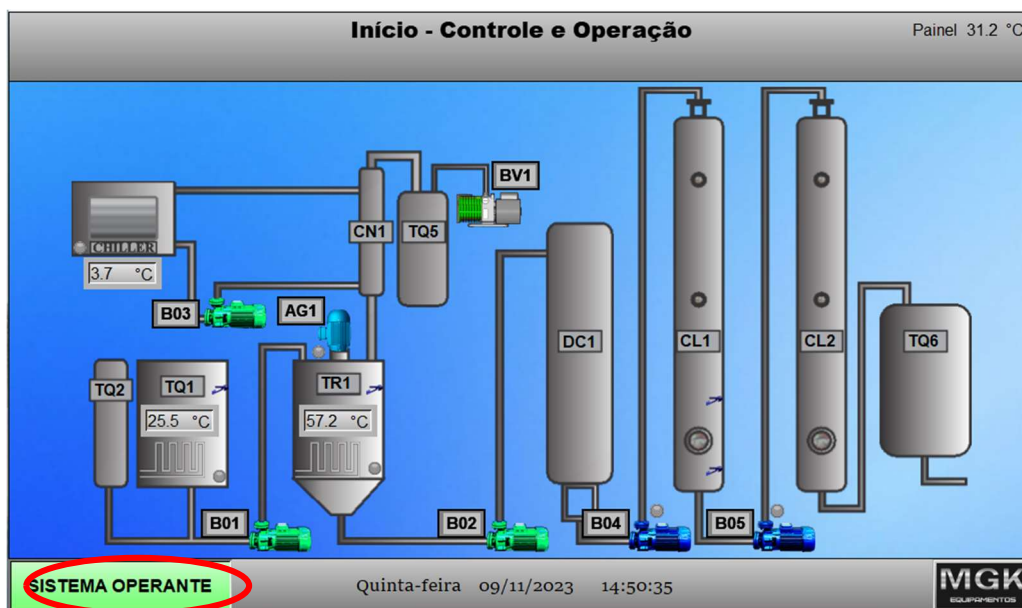
Figura 2 - Tela inicial da Unidade de Produção de Biodiesel



3. Habilitar sistema

- Na tela inicial (**Figura 2**), clique na tecla habilitar sistema, para tornar o *Sistema Operante* (**Figura 3**).

Figura 3 – Tela inicial indicando que o sistema se encontra em modo de operação



4. Acionamento do sistema de resfriamento (Chiller)

O acionamento da recirculação do fluido de arrefecimento do sistema de condensação de refluxo (CN2) de metanol, é realizado pela bomba B03. As temperaturas de operação e histerese do Chiller devem ser ajustadas de acordo com a temperatura de resfriamento desejada. Neste caso, selecionar uma temperatura adequada para condensação do metanol que possui ponto de ebulição de 64,7 °C.

4.1 Iniciar a operação

- Verificar se a válvula de saída do chiller está fechada.
- Conferir o nível do fluido de resfriamento (preferencialmente água destilada).
- Abrir totalmente a válvula V-18 e parcialmente a V-19 para ajuste da vazão.
- Ligar a bomba B03 na tela inicial para iniciar a recirculação do fluido (Figura 1).

- Acessar o chiller tocando no ícone da tela inicial (Figura 1) e selecionar o **Modo Automático**. Ajustar os parâmetros de temperatura: **Setpoint = 20 °C** e **Histerese = 2 °C** (Figura 4).
- Ligar o chiller pelo botão **Ctrl do Chiller** e verificar se o status indica operação (Figura 4).
- Manter o sistema de resfriamento ligado até o fim da reação e a transferência da mistura do RT1 para o decantador DC1.

Figura 4 – Ajuste da temperatura do Chiller



5. Carregamento das matérias primas e catalisador

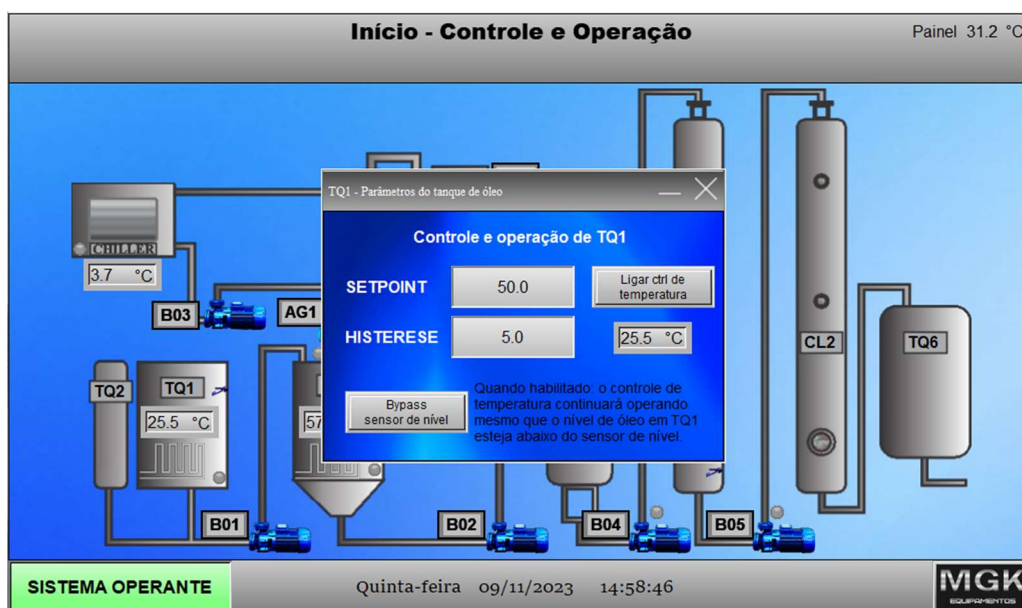
5.1 Carregamento do óleo vegetal

- Carregar o tanque de pré-aquecimento **TQ1** com até **70 L de óleo vegetal**, garantindo que a resistência permaneça sempre submersa.
- Fechar a válvula **V-1**, abrir a válvula de respiro **VR**, abrir a boca de entrada e realizar o carregamento do óleo; após isso, fechar a boca de entrada.

5.2 Pré-aquecimento do óleo vegetal

- Iniciar o pré-aquecimento acessando o **TQ1** na tela inicial e ajustando os parâmetros de temperatura.
- Ajustar a **temperatura de operação para 65 °C** e a **histerese para 3 °C**, conforme a condição usual de transesterificação (Figura 5).
- Ligar o controle de temperatura e verificar se o sistema indica aquecimento ativo.
- Atentar para o uso do **Bypass do Sensor de Nível**, habilitando-o apenas quando o volume de óleo for inferior a 70 L e garantindo que a resistência esteja submersa.
- Manter o aquecimento até atingir a temperatura desejada; para desligar, acessar novamente o TQ1 e desativar o controle de temperatura.
- Enquanto o óleo aquece, carregar o tanque de metanol **TQ2** com **17,5 L**, reservando cerca de **1 L** para lavagem da tubulação do tanque de catalisador **TQ3**.
- Para o carregamento do metanol, fechar a válvula **V-2**, abrir o respiro **VR**, abrir a boca de entrada, adicionar o metanol e, ao final, fechar a boca de entrada.

Figura 5 – Ajuste da temperatura do TQ1.



5.3 Carregamento do metanol

- Carregar o tanque de metanol TQ2 com 17,5 L (25% do volume de óleo ou razão molar óleo/metanol 1:6).
- Reservar aproximadamente 1 L de metanol para lavagem da tubulação do tanque de catalisador TQ3.
- Fechar a válvula V-2 e abrir a válvula de respiro VR do TQ2.
- Abrir a boca de entrada BE e realizar o carregamento do metanol com auxílio de um funil.
- Após o carregamento, fechar a boca de entrada.
- Iniciar o carregamento do catalisador no tanque TQ3.

5.4 Carregamento do metóxido de sódio (catalisador)

- Carregar o tanque de catalisador **TQ3** com **1,4 L** (2% do volume de óleo), ajustando o volume conforme o índice de acidez do óleo vegetal.
- Fechar a válvula **V-3** e abrir a válvula de respiro **VR** do **TQ3**.
- Abrir a boca de entrada **BE** e realizar o carregamento do metóxido com auxílio de um funil.
- Após o carregamento, fechar a boca de entrada.
- Iniciar a transferência do óleo para o reator **RT1** e, em seguida, transferir o metanol e o catalisador.

5.5 Transferência do óleo vegetal

- Aguardar o óleo atingir a temperatura de pré-aquecimento no **TQ1**.
- Verificar se o dreno da tubulação está fechado.
- Fechar as válvulas **V-2, V-3, V-5, V-8 e V-9**.
- Abrir as válvulas **V-1, V-4, V-6 e V-7**.

- Desligar a resistência elétrica do tanque **TQ1**.
- Acessar a tela inicial e acionar a bomba **B01** para iniciar a transferência do óleo (Figura 1).
- Monitorar o visor de nível do reator **RT1** até o término da transferência.
- Ao concluir, desligar a bomba **B01** e fechar as válvulas **V-1**, **V-4**, **V-6** e **V-7**.
- Antes de transferir o metanol e o catalisador, acionar o agitador e ajustar a temperatura e o tempo de reação do **RT1**.

5.6 *Acionamento do agitador*

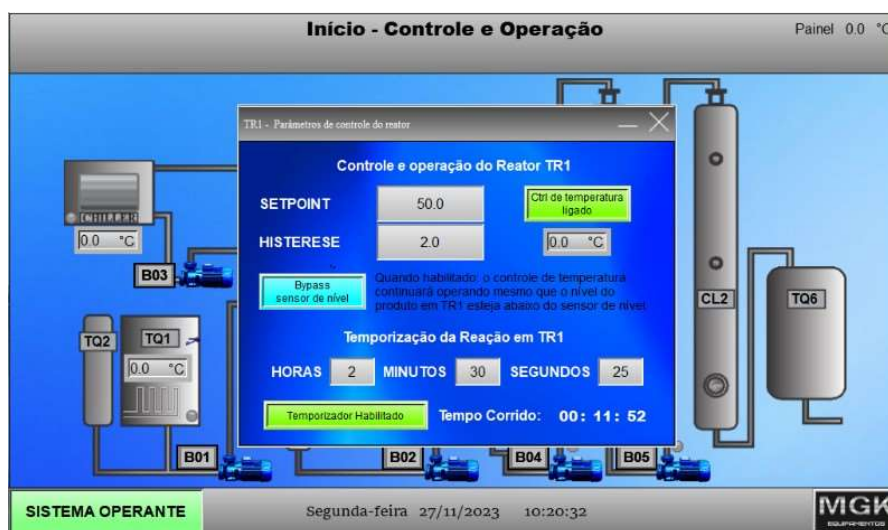
- Acessar a configuração do agitador **AG1** tocando na imagem acima do reator **RT1** na tela inicial (Figura 3).
- Ajustar a rotação do motor (0 a 1900 rpm) pelo campo numérico e confirmar em **ENT**.
- Ligar o agitador pressionando o botão **Ligar Agitador** e verificar se o status fica verde.
- Manter a agitação durante todo o tempo de reação.
- Desligar o agitador automaticamente ao fim do tempo programado ou manualmente, pressionando novamente o botão de agitação.

5.7 *Ajuste da temperatura e do tempo de reação*

- Acessar a configuração do reator **RT1** tocando em sua imagem na tela inicial (Figura 3).
- Ajustar a temperatura **de operação**, **histerese** e o **tempo de reação** no pop-up de configuração (Figura 6).
- Sugestão de parâmetros: **65 °C** (operação), **3 °C** (histerese) e **30 min** (tempo de reação).

- Inserir os valores de temperatura e tempo pelo teclado numérico e confirmar em **ENT**.
- Ligar o controle de temperatura acionando **Ligar ctrl de Temperatura** e verificar o status ativo.
- Atentar para a função **Bypass do Sensor de Nível**, habilitando-a apenas quando o volume for inferior a 70 L e garantindo a resistência submersa.
- Habilitar o temporizador para iniciar a contagem do tempo de reação.
- Ao término da reação, os sistemas de aquecimento e agitação são desligados automaticamente, podendo também ser desligados manualmente, se necessário.

Figura 6 – Ajuste da temperatura e do tempo do RT1



5.8 Transferência do metanol e do catalisador

- Transferir simultaneamente o metanol (TQ2) e o catalisador (TQ3) para o reator RT1.
- Verificar se o dreno da tubulação está fechado.
- Fechar as válvulas **V-1, V-5, V-8 e V-9**.
- Abrir as válvulas **V-2, V-3, V-4, V-6 e V-7**.

- Acionar a bomba **B01** pela tela inicial para iniciar a transferência.
- Monitorar o nível do **RT1** durante a transferência.
- Ao finalizar, desligar a bomba **B01** e fechar as válvulas **V-2 e V-3**.
- Adicionar **1 L de metanol** ao **TQ3** para lavagem da tubulação.
- Abrir a válvula **V-3** e acionar novamente a bomba **B01** para transferir o metanol de lavagem ao **RT1**.
- Após a transferência, desligar a bomba **B01** e fechar as válvulas **V-2, V-3, V-4, V-5, V-6, V-7 e V-9**.
- Iniciar a reação de **transesterificação** no **RT1**.

6 Reação de transesterificação

6.1 Início:

- Iniciar a **reação de transesterificação** após o óleo, metanol e catalisador estarem no **RT1**.
- Fechar as válvulas **V-6, V-7, V-8 e V-9**.
- Manter em operação os sistemas previamente acionados: **chiller, agitação, controle de temperatura e temporizador** do **RT1**.
- A reação é finalizada ao término do tempo programado, com desligamento automático da agitação e do aquecimento (ou manual, se necessário).
- Considerar que o tempo de reação pode variar conforme matéria-prima, álcool e catalisador; para as condições indicadas, recomenda-se **30 min**.
- Após o término da reação, preparar a transferência da mistura reacional para o **DC1**.

6.2 Transferência para o decantador DC1:

- Fechar as válvulas **V-6, V-8 e V-13**.

- Abrir as válvulas **V-7, V-9 e V-10**.
- Acionar a bomba **B02** na tela inicial para iniciar a transferência.
- Ao concluir, desligar a bomba **B02**.
- Fechar as válvulas **V-7, V-9 e V-10**.
- Aguardar o tempo de **decantação**.

7 Decantação

7.1 Início:

- Realizar a decantação para separar **glicerina bruta** e **biodiesel**, com tempo mínimo de **1 hora**.
- Fechar as válvulas **V-10, V-11, V-12 e V-13**.
- Verificar a presença de **glicerina bruta** (marrom escuro) no visor inferior do **DC1**.
- Verificar a presença de **biodiesel** (amarelo claro) no visor lateral do **DC1**.
- Após a decantação, iniciar a transferência da glicerina bruta para o **TQ4**.

7.2 Transferência da glicerina bruta (DC1 → TQ4):

- Fechar as válvulas **V-10, V-11, V-13 e V-20**.
- Abrir o respiro **VR** do **TQ4**.
- Realizar a transferência por **gravidade**, controlando o fluxo pela válvula **V-12**.
- Manter **V-12 aberta** enquanto a coloração no visor for **marrom escuro** (glicerina).
- Fechar **V-12** quando a coloração mudar para **amarelo claro** (biodiesel).

- Reabrir **V-12**, se necessário, até o escoamento completo da glicerina, e então fechá-la.
- Após remover a glicerina, preparar a transferência do biodiesel para o **RT1**.

7.3 Transferência do biodiesel (DC1 → RT1):

- Fechar as válvulas **V-6, V-9, V-10, V-11, V-12 e V-15**.
- Abrir as válvulas **V-7, V-13 e V-14**.
- Acionar a bomba **B-4** pela tela inicial para iniciar a transferência.
- Ao finalizar, desligar a bomba **B-4**.
- Fechar as válvulas **V-7, V-13 e V-14**.
- Iniciar o processo de **recuperação do metanol residual** no biodiesel.

8 Recuperação do metanol do biodiesel

8.1 Início:

- Recuperar o **metanol remanescente** por evaporação no **RT1** e condensação no **CN1**, com coleta no **TQ5** para reutilização.
- Fechar as válvulas **V-6, V-7, V-8 e V-9**.
- Manter o **sistema de resfriamento** acionado durante toda a extração do metanol e até a transferência do biodiesel ao **DC1**.
- Ajustar e acionar a **agitação** do RT1 (0 a 1900 rpm), desligando-a ao final da extração.
- Ajustar a **temperatura** para **60 °C** e **histerese de 2 °C**, ligando o aquecimento e desligando-o ao término da extração.
- Acionar o **sistema de vácuo** conforme procedimento específico.
- Encerrar a etapa quando cessar o fluxo de metanol condensado, verificado pela estabilização do nível no **TQ5**.

- Considerar que o tempo de extração varia conforme álcool, catalisador e características do óleo.
- Após a extração, transferir o **biodiesel** do **RT1** para o **DC1**.

8.2 Recuperação do metanol (sob vácuo):

- Realizar a recuperação do metanol sob **vácuo** para reduzir a temperatura de ebulição e o tempo de processo.
- Fechar as válvulas **V-6**, **V-8** e **V-9**.
- Fechar as válvulas **VR** e **VS** do tanque **TQ5** e da coluna de vácuo **AR1**.
- Abrir a válvula **V-7**.
- Verificar o nível de água da coluna de vácuo **AR1**.
- Acionar a bomba de vácuo **BV1** pela tela inicial e monitorar o nível de óleo da bomba.
- Manter o vácuo na faixa de **-100 a -150 mmHg**, ajustando pela válvula **V-7**.
- Acompanhar a recuperação do metanol pelo visor de nível do **TQ5**.
- Ao término da extração, desligar a bomba de vácuo **BV1** e abrir totalmente a válvula **V-7**.

8.3 Transferência do biodiesel para o decantador (RT1 → DC1):

- Fechar a válvula **V-6** e abrir as válvulas **V-7**, **V-9** e **V-10**.
- Acionar a bomba **B02** para iniciar a transferência do biodiesel.
- Após a transferência, desligar a bomba **B02**.
- Fechar as válvulas **V-7**, **V-8**, **V-9** e **V-10**.
- Prosseguir com a transferência do biodiesel para a **coluna de lavagem CL1**.

9 Purificação do biodiesel

A purificação seca do biodiesel ocorre por **adsorção em resinas de troca iônica**, com **lavagem na CL1** e **polimento na CL2**.

9.1 Transferência do biodiesel (DC1 → CL1):

- Fechar as válvulas **V-14** e **V-21**.
- Abrir as válvulas **V-13**, **V-15**, **V-16** e **V-17**.
- Abrir a válvula de respiro **VR** do tanque **TQ6**.
- Acionar a bomba **B04** pela tela inicial.
- Configurar a bomba **B04** em modo **cíclico** (Tempo Ligado / Tempo Desligado) ou **manual** (**Figura 7**).
- Sugestão de operação cíclica: **10 s ligada / 10 s desligada**.
- Ligar a bomba **B04** e verificar o status ativo.
- Acionar também a bomba **B05**, responsável pela transferência do biodiesel da **CL1** para a **CL2**.

9.2 Transferência do biodiesel (CL1 → CL2):

- Configurar a bomba **B05** em modo **Manual** ou **Automático**.
- No modo automático, a bomba **B05** é acionada por sensor de nível no fundo da **CL1** (**Figura 8**).
- Monitorar a alimentação do biodiesel nas colunas **CL1** e **CL2** pelos visores de linha.
- A bomba **B05** transfere o biodiesel da **CL2** para o tanque de armazenamento **TQ6**.
- Após concluir a transferência **DC1** → **CL1**, desligar a bomba **B04**.
- Após finalizar a transferência **CL2** → **TQ6**, desligar a bomba **B05**.

Figura 7 – Ajuste do modo de operação da bomba B04 de transferência do biodiesel do DC1 para coluna CL1



Figura 8 – Ajuste do modo de operação da bomba B05 de transferência do biodiesel da coluna CL1 para CL2



10 Armazenamento do Biodiesel

O biodiesel acabado será transferido para o tanque TQ-6 e na sequência transferido para galões ou tambores devidamente rotulados/identificados para

ser analisado. Estando de acordo com as especificações da ANP, estará pronto para o uso.

11 Higienização da Unidade Experimental

- Realizar a **limpeza periódica** da unidade experimental de produção de biodiesel.
- Desmontar os componentes e limpar as **partes externas** com água, detergente neutro e esponja ou escova **antiabrasiva**.
- Evitar a lavagem **interna** dos equipamentos, realizando-a apenas em casos de extrema necessidade, com água e detergente neutro.
- Antes da lavagem, **desligar os disjuntores** de alimentação da planta.
- Evitar molhar **componentes eletrônicos** durante o procedimento.
- Limpar e **condicionar adequadamente** as peças desmontadas para evitar perdas ou danos.
- Ressaltar que os procedimentos de montagem, desmontagem e limpeza são simples e podem ser realizados por alunos ou técnicos do laboratório.

12 Testes Experimentais

12.1 Teste do Metanol: Este ensaio é amplamente reconhecido como o método padrão para verificar a eficiência da reação de transesterificação.

- Procedimento: Em um tubo de ensaio ou proveta, adicionar 27 mL de metanol e 3 mL de biodiesel.
- Ação: Agitar vigorosamente por aproximadamente 30 segundos e deixar a mistura em repouso por 10 minutos.
- Interpretação: O biodiesel deve apresentar solubilidade completa no metanol. A presença de sedimentos ou turbidez indica a existência de glicerídeos não reagidos, os quais podem causar problemas operacionais, como entupimento de bicos injetores.

12.2 Teste de Lavagem (Wash Test): Utilizado para avaliar a presença de resíduos de sabão ou catalisador no biodiesel.

- Procedimento: Misturar volumes iguais de água destilada e biodiesel em um frasco transparente.
- Ação: Inverter o frasco suavemente algumas vezes, evitando agitação excessiva que possa formar emulsões estáveis.
- Interpretação: A água deve decantar rapidamente e permanecer límpida. A formação de uma interface turva ou esbranquiçada indica a necessidade de novas etapas de purificação.

12.3 Índice de Acidez: O índice de acidez expressa a quantidade de hidróxido de potássio (KOH) necessária para neutralizar os ácidos graxos livres presentes em 1 g de biodiesel.

- Procedimento: Pesar cerca de 2 g de biodiesel e dissolver em uma mistura de álcool/éter ou em álcool isopropílico previamente neutralizado.
- Titulação: Adicionar algumas gotas de fenolftaleína como indicador e titular com solução padronizada de KOH 0,1 mol/L até o aparecimento de coloração rosa persistente.
- Cálculo:

$$\text{Índice de Acidez} = \frac{V \cdot C \cdot 56,1}{m}$$

onde (V) é o volume de titulante gasto, (C) a concentração da base e (m) a massa da amostra.

12.4 Ponto de Fulgor (Flash Point): Determinado em equipamento do tipo Vaso Fechado (Pensky-Martens).

- Procedimento: A amostra é aquecida gradualmente, enquanto uma chama-piloto é aplicada à superfície do líquido em intervalos regulares.

- Resultado: A temperatura na qual ocorre uma ignição momentânea caracteriza o ponto de fulgor.
- Segurança: Valores baixos (por exemplo, inferiores a 100 °C) indicam a presença de metanol residual, o que representa risco durante o armazenamento e o transporte.

12.5. Estabilidade e Umidade: Teor de Água (Método Karl Fischer)

- O teor de água é determinado, preferencialmente, por titulação Karl Fischer, geralmente em modo potenciométrico.
- Princípio: A água reage de forma seletiva com o reagente de iodo, permitindo a quantificação de umidade em níveis muito baixos (ppm).
- Importância: A presença de água no biodiesel pode causar corrosão, degradação do combustível e crescimento microbiológico em tanques de armazenamento.

ANEXO IV

Tutorial de Primeiros Passos no Simulador de Processos SuperPro
Designer

Tutorial 1: Simulação de Processo de Fermentação

1 Definição do Processo e Parâmetros de Simulação

As velocidades de crescimento celular e os efeitos das condições ambientais sobre esse crescimento constituem aspectos fundamentais da engenharia biológica. O método mais comum e versátil utilizado pela indústria para a análise do crescimento celular é a fermentação descontínua em biorreatores. A fermentação em biorreator permite que o crescimento celular ocorra sob condições operacionais bem definidas e controladas. Uma reação global típica para processos fermentativos pode ser representada por:



Todas as correntes de alimentação entram no reator em condições normais de temperatura e pressão (STP). Um total de 7.800 kg de água é alimentado ao reator a uma vazão de 100 L/min, com um tempo de preparação (setup time) de 5 minutos. Além disso, 380 kg de meio são alimentados ao reator a uma vazão de 10 kg/min, com um tempo de preparação de 20 minutos. O ciclo de fermentação ocorre a uma temperatura de 37 °C, com uma taxa de aquecimento constante de 0,5 °C/min. A velocidade de reação calculada está referida à formação de biomassa (dX/dt); assim, a biomassa foi definida como o componente de referência, apresentando uma velocidade específica máxima de crescimento ($\mu_{\max}$) de 0,20 h⁻¹.

O meio consiste em um único substrato, com constante de saturação (K_s) de 35 mg/L. A cinética da reação é de primeira ordem em relação à biomassa e apresenta uma entalpia de reação de -3697 kcal/kg, tendo o oxigênio como componente de referência, à temperatura de 37 °C. Após o término da fermentação, o produto é resfriado até 5 °C utilizando glicol como fluido refrigerante, com uma taxa de resfriamento de 0,5 °C/min, sendo então transferido do fermentador em um tempo total de 272 minutos.

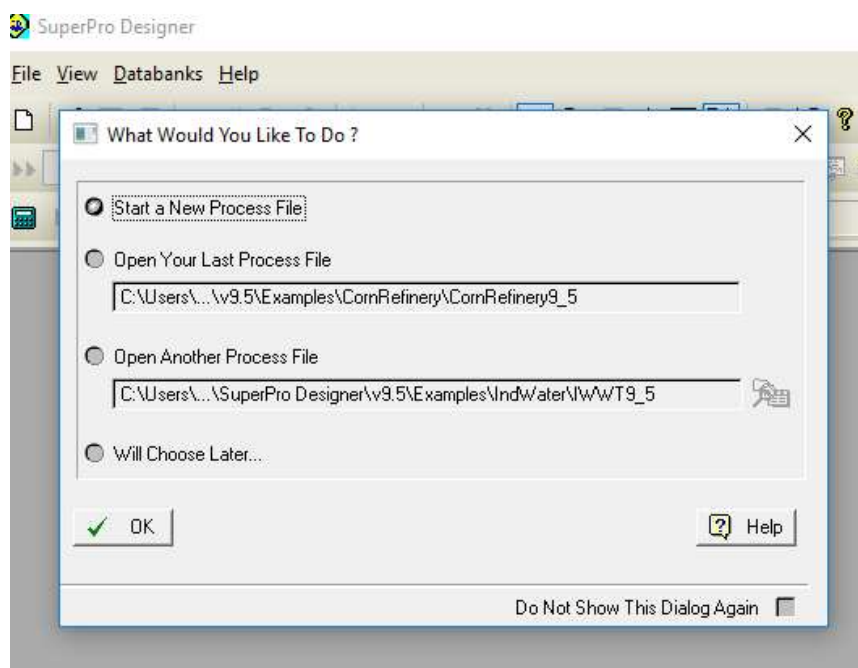
2 Objetivo

Determinar a quantidade de tempo requerido para completar o consumo dos componentes de reação e qual é o reagente limitante do sistema.

3 Procedimento

Ao abrir o SuperPro Designer, uma janela inicial será aberta para começar um novo processo de simulação. Clique em Start a New Process File e depois em Ok (Figura 1).

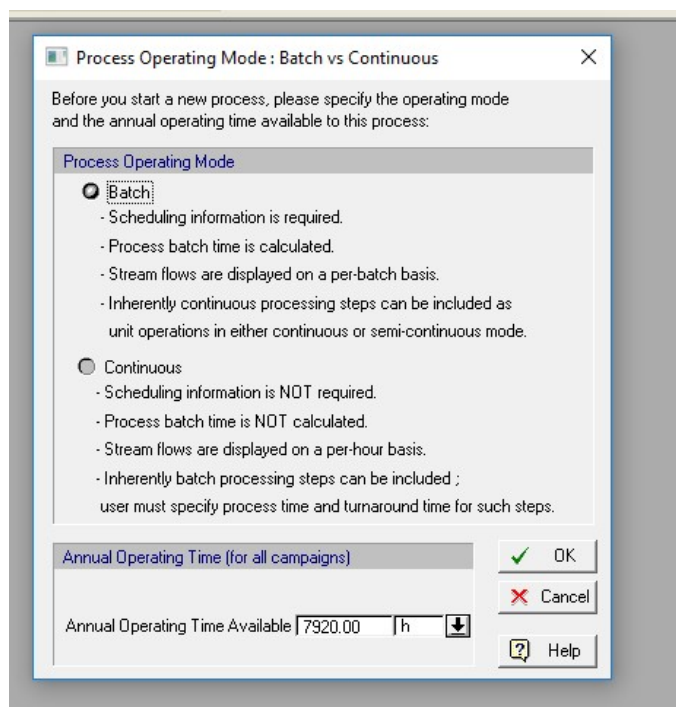
Figura 12 - Janela de inicialização do SuperPro Designer.



A Figura 2 apresenta a janela de configuração do **modo de operação do processo** no SuperPro Designer, na qual é selecionada a opção **Batch (descontínuo)**. Nesse modo, o software exige a definição de informações de programação (*scheduling*), calcula automaticamente o tempo de cada batelada e exibe as vazões das correntes com base em cada ciclo de operação. Além disso, o modo batch permite a inclusão de etapas inerentemente contínuas, que podem ser modeladas como operações unitárias contínuas ou semicontínuas dentro do processo. Essa escolha é adequada para a simulação de

fermentações, pois reflete com maior fidelidade a natureza descontínua do crescimento celular em biorreatores e possibilita uma análise detalhada dos tempos de processo e do consumo de reagentes ao longo de cada batelada.

Figura 13 - Escolha do modo de operação do processo: batelada ou contínuo.



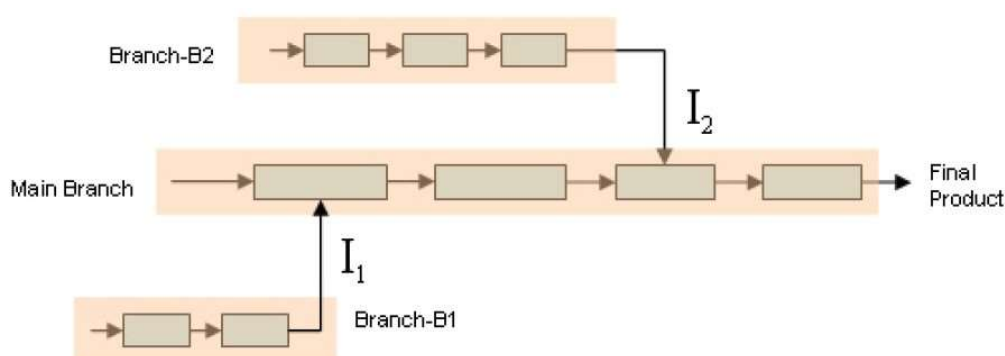
Em simulações que envolvem múltiplas etapas, como reação, separação e purificação, é fundamental identificá-las e organizá-las em seções principais (main sections), de modo a facilitar a análise, a interpretação dos resultados e a estruturação do processo como um todo. Os conceitos de seções de processo (main sections) e ramos de processo (main branches) são utilizados para simplificar a elaboração de relatórios de custeio, avaliações econômicas e estimativas das necessidades de recursos, tais como matérias-primas, mão de obra, energia e agentes de transferência de calor, especialmente em processos industriais de grande porte e altamente integrados. Uma seção de processo consiste em um conjunto de operações unitárias agrupadas com um objetivo específico. Por exemplo, em uma planta bioquímica típica, as seções de processo podem incluir:

- Preparação de matéria-prima;
- Fermentação;

- Recuperação;
- Concentração do produto;
- Purificação do produto;
- Formulação e empacotamento do produto.

Um ramo de processo (main branch), por sua vez, corresponde a uma sequência ordenada de seções de processo que atuam de forma integrada para atingir um determinado objetivo. Em processos complexos de síntese química em múltiplas etapas, comuns na produção de fármacos sintéticos e produtos agroquímicos, esse conceito permite diferenciar o percurso principal de produção dos percursos laterais de síntese, facilitando tanto a análise técnica quanto a avaliação econômica do sistema.

Figura 14 - Dividindo um grande processo em ramificações e seções.



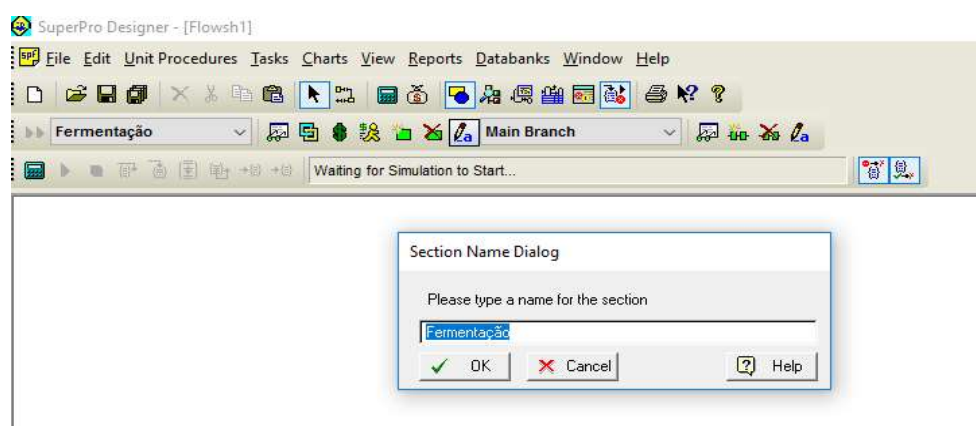
Para os fins desta aplicação, os ramos de processo não servem apenas para definir a estrutura lógica do fluxograma, mas também para orientar o software na forma como os resultados são organizados e reportados por seção, ramo a ramo. Por padrão, cada processo é assumido como sendo composto por um único ramo, denominado “Main”, e esse ramo principal é inicialmente configurado para conter apenas uma única seção (Figura 3).

Embora seja possível adicionar novas seções ao ramo principal, e até mesmo renomeá-lo conforme a necessidade do usuário, o ramo designado como principal não pode ser excluído. No estudo de caso, colocou-se o nome de “Fermentação” como é mostrado na Figura 4. De forma análoga, é permitido adicionar novas seções a qualquer ramo e renomear a seção principal associada

a ele; contudo, não é possível excluir a seção definida como principal dentro de um ramo.

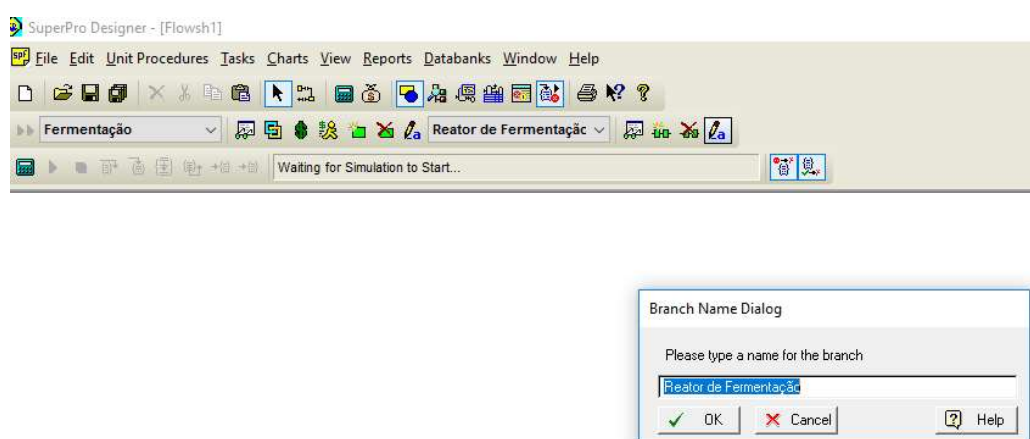
O SuperPro Designer oferece flexibilidade para editar e personalizar essas informações, permitindo ao usuário organizar o processo de maneira mais coerente com a lógica operacional, facilitar a análise dos resultados e aprimorar a apresentação de relatórios técnicos e econômicos.

Figura 15 - Configurando seções no SuperPro Designer.



Outro item que pode ser modificado é o “Main Branch”, onde são especificadas as reações dos processos (Figura 5).

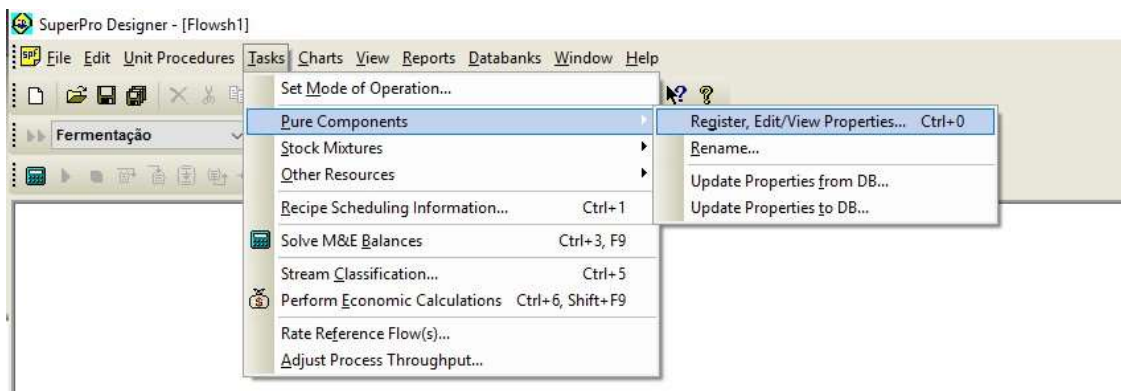
Figura 16 - Dividindo a simulação em sub-seções: reator de fermentação.



É preciso definir agora os componentes do processo de fermentação e no sistema. Para a inicialização do processo, é fundamental definir os componentes que integrarão o sistema (Figura 6). Utilize o menu de tarefas para registrar ou

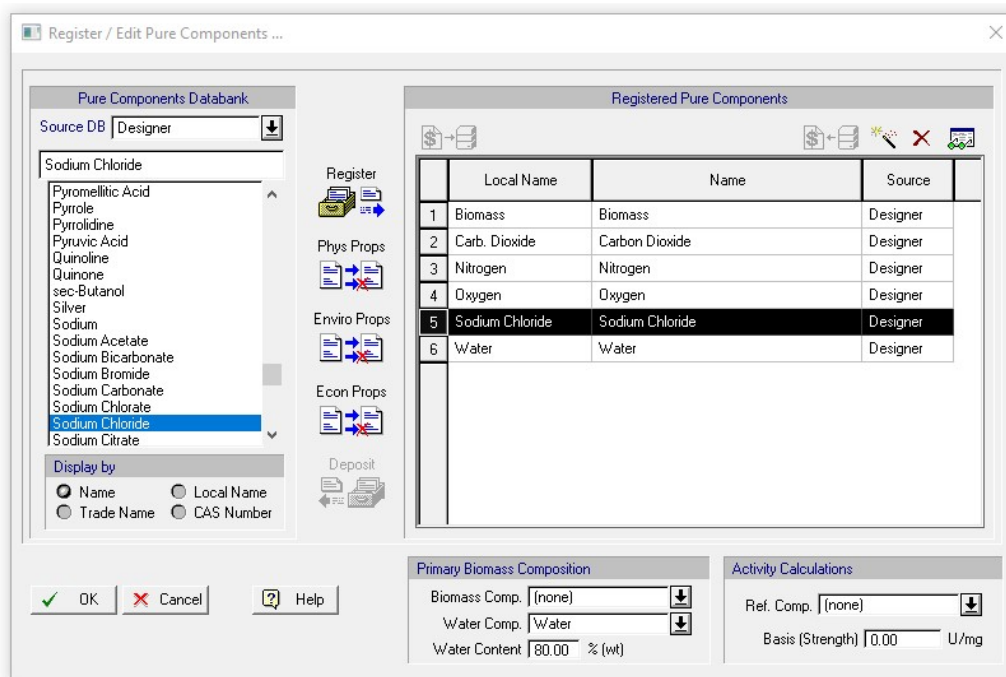
gerenciar as propriedades físico-químicas das substâncias do projeto.

Figura 17 - Seleção dos componentes que farão parte da simulação.



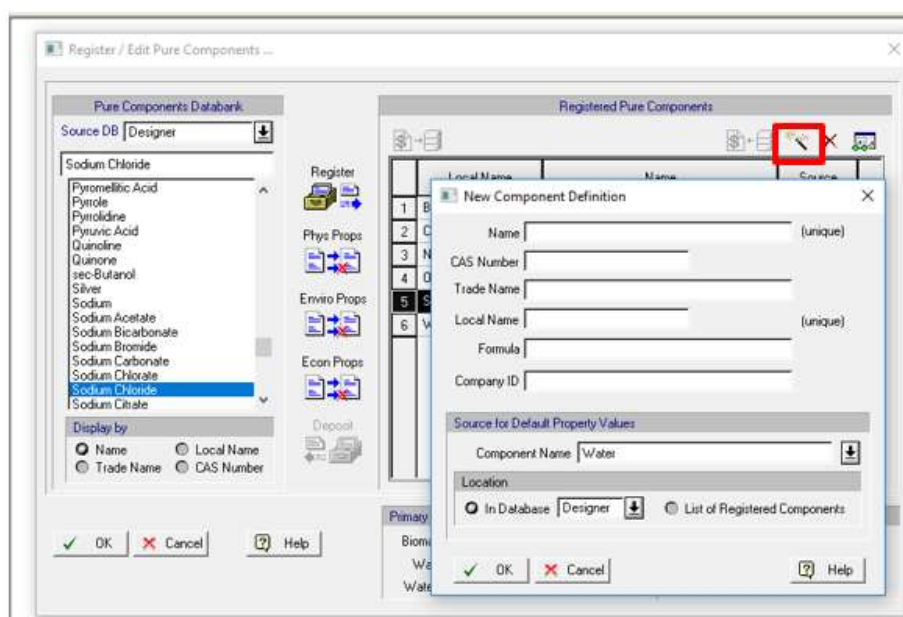
Procure as substâncias de interesse e adicione no seu projeto clicando em “Register” (Figura 7). Os componentes registrados para a simulação de fermentação no software SuperPro Designer são Biomassa (Biomass), Dióxido de Carbono (Carbon Dioxide), Nitrogênio (Nitrogen), Oxigênio (Oxygen), Cloreto de Sódio (Sodium Chloride) e Água (Water).

Figura 18 - Seleção das substâncias que irão compor o projeto.



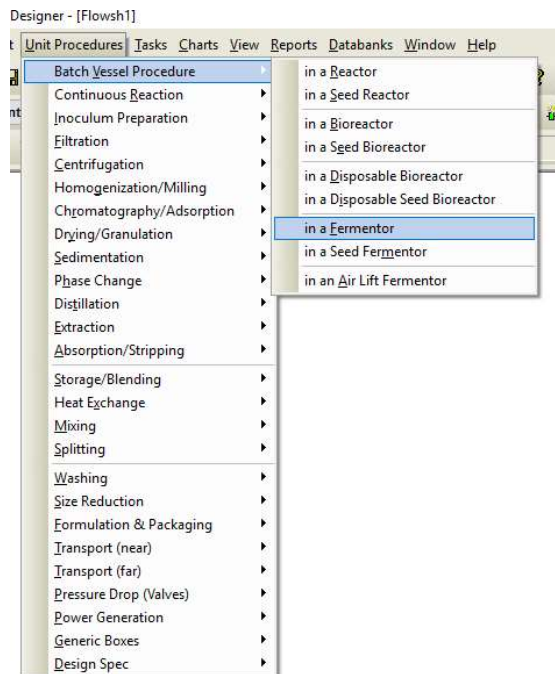
Para a correta representação do processo fermentativo na simulação, foram adicionados ao banco de componentes do SuperPro Designer os componentes Impurezas (Impurities), MAB e Meio (Medium). A inclusão desses componentes permite descrever de forma mais realista o balanço de massa do sistema, contemplando tanto os subprodutos indesejáveis gerados durante a fermentação quanto o meio de cultivo utilizado como fonte de nutrientes. Clique no ícone da varinha mágica no quadro em vermelho e cadastre esses novos componentes (Figura 8).

Figura 19 - Cadastro de novos componentes no processo.



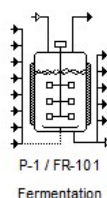
Agora vamos adicionar o Fermentador clicando na aba “Unit Procedures” conforme mostrado na Figura 9.

Figura 20 - Selecionando o fermentador no SuperPro Designer.



Em seguida, como mostrado na Figura 10, clique no ícone destacado em vermelho para adicionar correntes de processo.

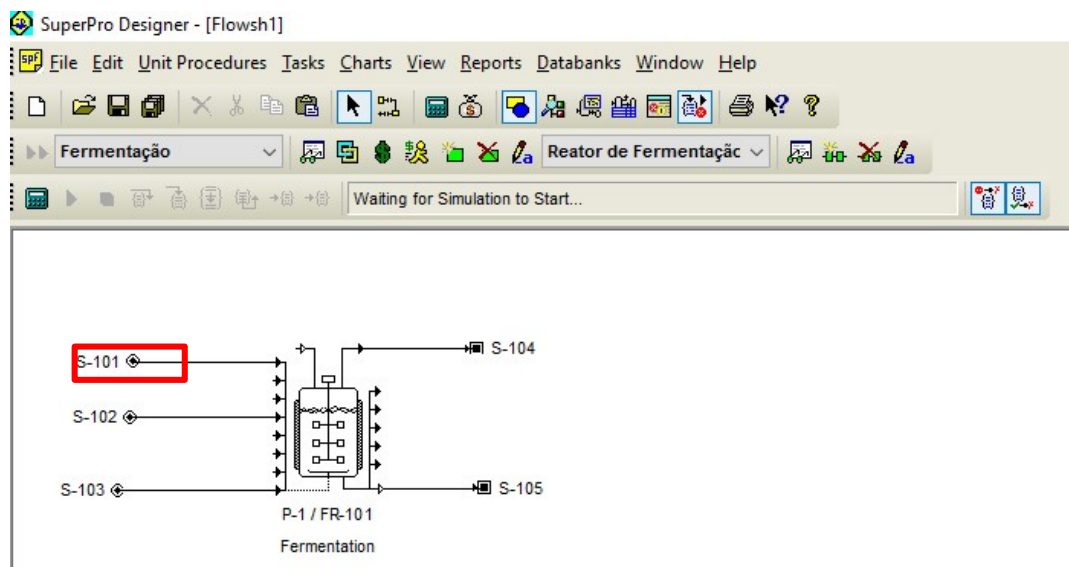
Figura 21 - Adicionando correntes de processo no reator de fermentação.



Adicione 3 correntes de alimentação (entrada) e 2 correntes de saída conforme ilustrado na Figura 11. A corrente inferior de saída é referente aos

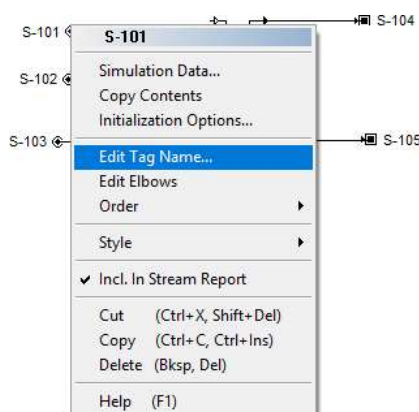
produtos formados e reagentes não consumidos na reação. A corrente superior de saída corresponde ao gás carbônico gerado na reação.

Figura 22 - Adicionando correntes de processo ao reator de fermentação.



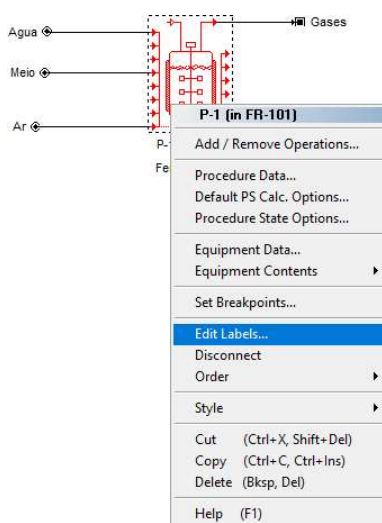
Altere os nomes das correntes clicando com o botão direito do mouse sobre elas e em seguida “Edit Tag Name” como mostrado na Figura 12. A primeira (S-101) será de Água, a segunda (S-102) de Meio e a terceira (S-103) de Ar. A quarta (S-104) será de Gases e a quinta (S-105) será nomeada de Fermentado.

Figura 23 - Alterando o nome das correntes.



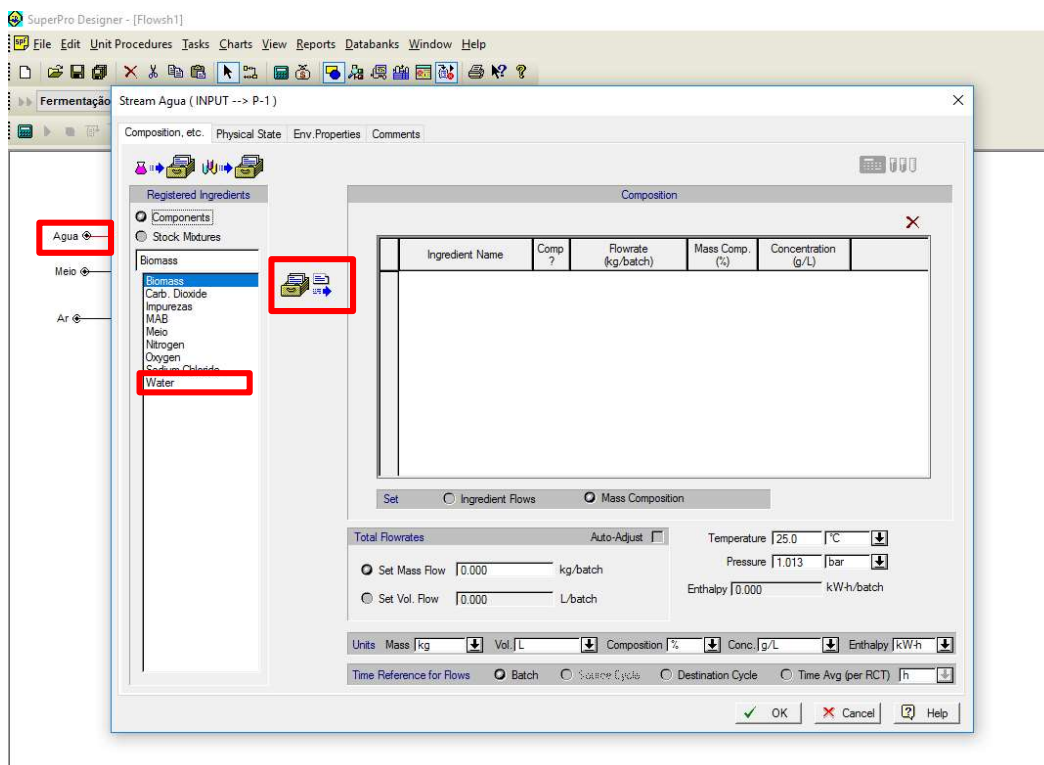
O mesmo pode ser feito para os equipamentos. Nesse caso, é clique com o botão direito do mouse sobre o fermentador e em seguida em “Edit Labels” (Figura 12).

Figura 24 - Alterando o nome do reator de fermentação.



Para adicionar informação nas correntes (dois clicks na corrente) e proceda conforme apresentado na Figura 14.

Figura 25 - Adicionando informações nas correntes.



Na primeira corrente nomeada de Água iremos adicionar 7.800 kg/batelada de água conforme indicado na Figura 15 e ajustar para as condições

de temperatura de 25 °C e pressão de 1,013 bar.

Figura 26 - Adicionando as informações do componente da primeira corrente "Água".

Stream Agua (INPUT --> P-1)

Composition, etc. Physical State Env. Properties Comments

Registered Ingredients

Components

Stock Mixtures

Biomass

Carb. Dioxide

Impurezas

MAB

Meio

Nitrogen

Oxygen

Sodium Chloride

Water

Composition

	Ingredient Name	Comp ?	Flowrate (kg/batch)	Mass Comp. (%)	Concentration (g/L)
1	Water	☒	7800.00000	100.0000	994.70433

Set ☒ Ingredient Flows ☐ Mass Composition

Total Flowrates Auto-Adjust ☐

☒ Set Mass Flow 7800.000 kg/batch

☐ Set Vol. Flow 7841.526 L/batch

Temperature 25.0 °C

Pressure 1.013 bar

Enthalpy 227.621 kW/h/batch

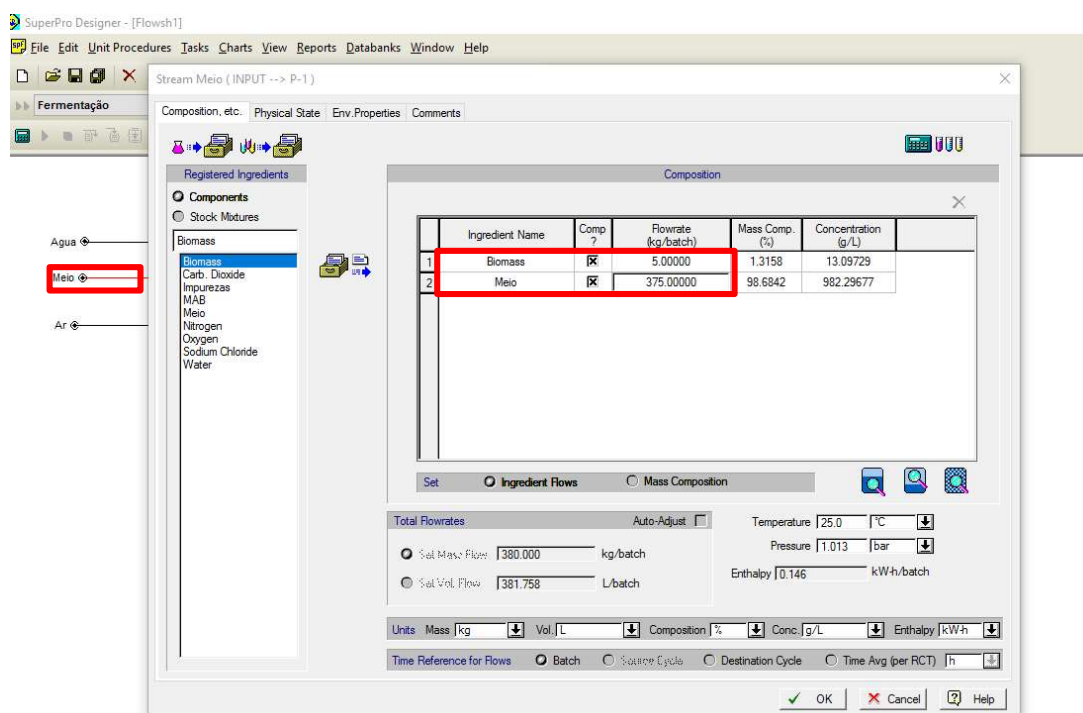
Units Mass kg Vol. L Composition % Conc. g/L Enthalpy kW-h

Time Reference for Flows ☒ Batch ☐ Source Cycle ☐ Destination Cycle ☐ Time Avg (per RCT) h

OK Cancel Help

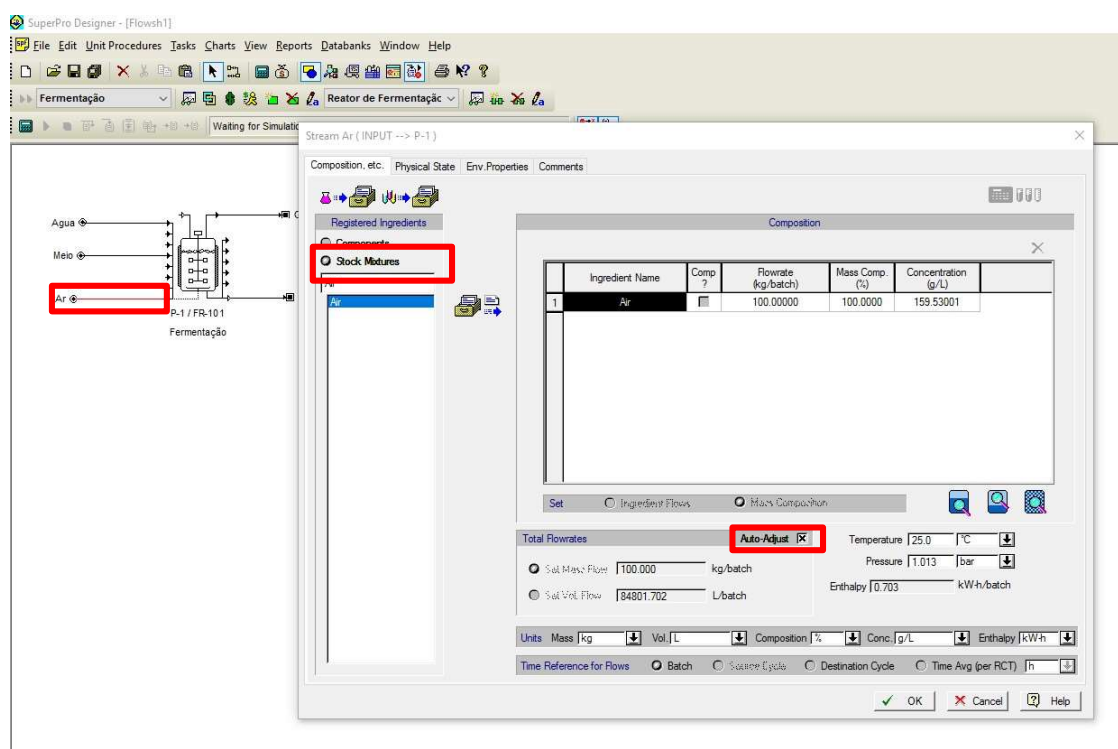
Na corrente "Meio" adicionam-se 5 kg de biomassa e 375 kg de meio conforme procedimento da Figura 16 nas mesmas condições de temperatura e pressão da corrente anterior: 25 °C e 1,013 bar, com entalpia associada de 0,146, ou seja, nas condições ambientes.

Figura 27 - Adicionando os componentes da corrente "Meio".



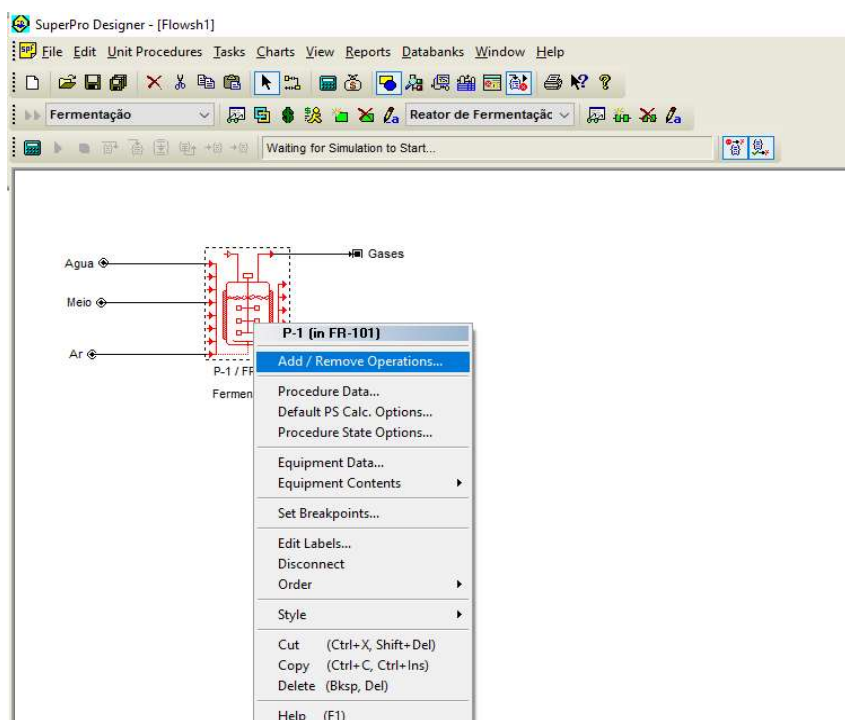
O mesmo procedimento para a corrente de Ar como é mostrado na Figura 17. Não se preocupe em definir a composição dessa corrente. Como padrão do software ela já corresponde a 21% de gás oxigênio e 79% de gás nitrogênio.

Figura 28 - Adicionando informações da corrente "Ar".



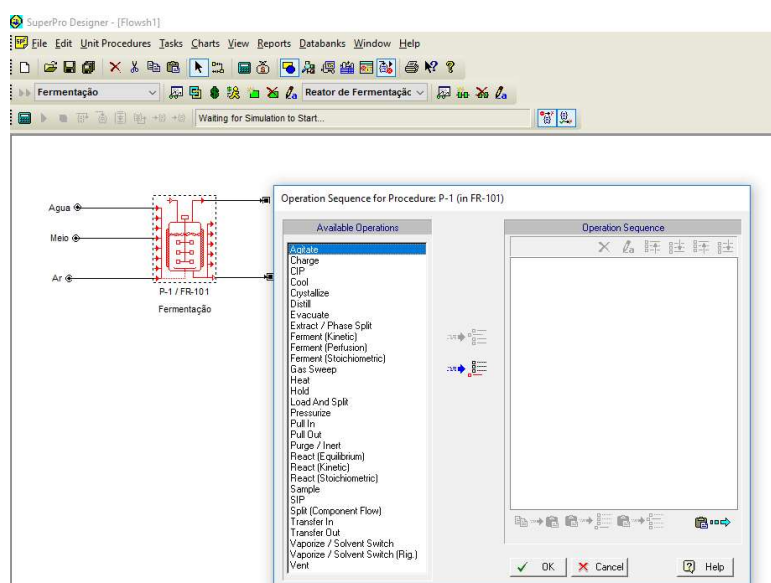
Precisamos colocar as operações que acontecem na ordem certa no fermentador. Para isso, clique com o botão direito e depois em “Add / Remove Operations” como é apresentado na Figura 18.

Figura 29 - Configurando as operações que vão acontecer no fermentador.



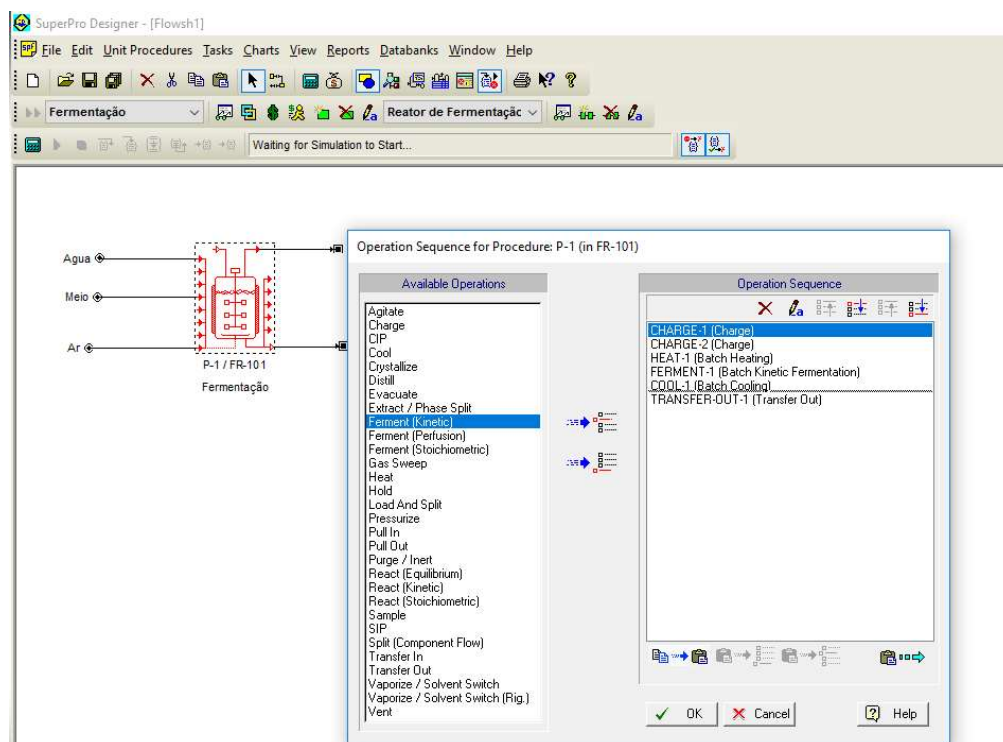
Vai abrir uma janela como mostrada na Figura 19 em que você deverá adicionar os procedimentos que serão realizados no reator de fermentação.

Figura 30 - Selecionando operações para o fermentador.



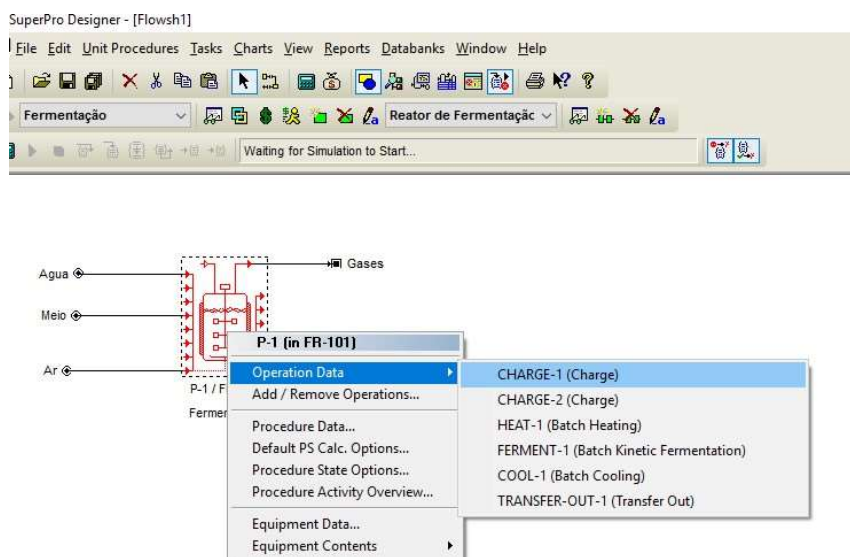
Selecione as operações na mesma ordem que aparecem na Figura 20: carregamento 1 e 2, aquecimento, fermentação, resfriamento e transferência do fermentado.

Figura 31 - Operações selecionadas que deseja-se que aconteçam no fermentador.



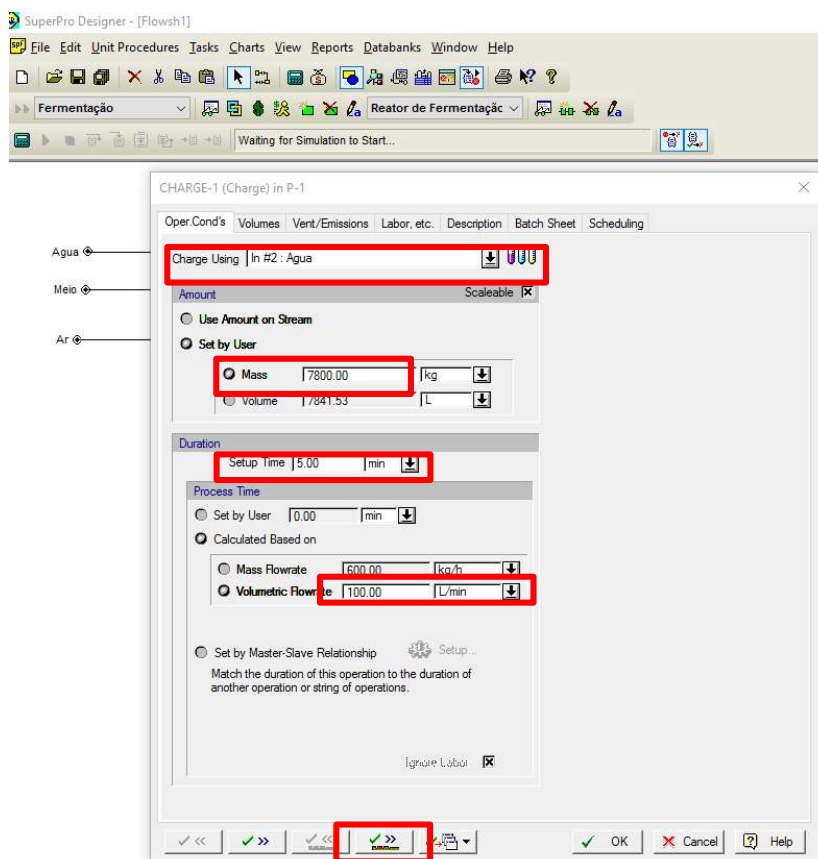
Especificar o que acontece nas operações colocadas iniciando com os carregamentos. Clique com o botão direito do mouse e em seguida em "Operations Data" e depois em "CHARGE-1" como mostrado na Figura 21.

Figura 32 - Configurando a primeira operação no fermentador.



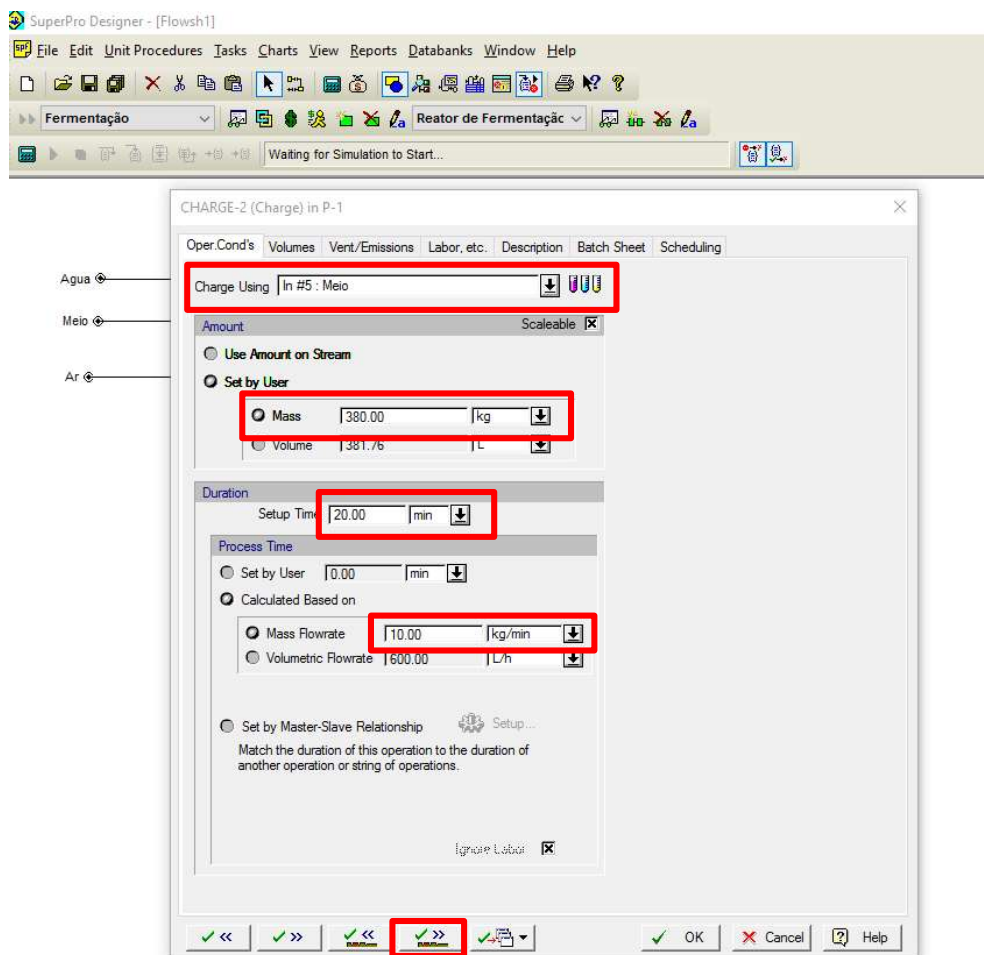
Siga as instruções apresentadas na Figura 22 para iniciar o primeiro carregamento do processo, realizado por meio da corrente de água. Esse procedimento pode ser interpretado como o acionamento de uma bomba responsável por preencher inicialmente o reator com água.

Figura 33 - Primeiro carregamento como operação no fermentador.



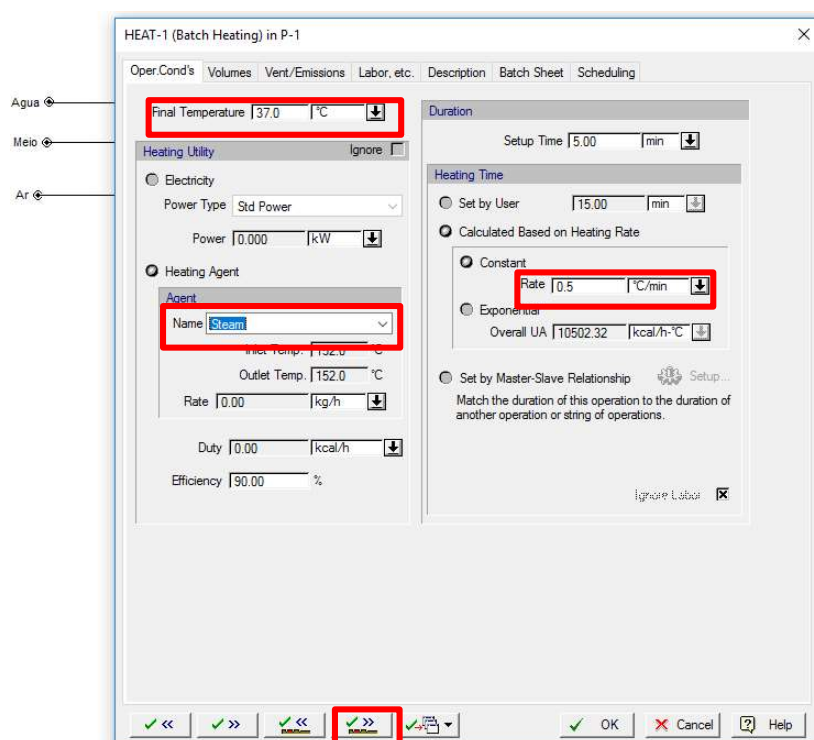
Siga as instruções apresentadas na Figura 23 para iniciar o segundo carregamento do processo, realizado por meio da corrente “Meio”. Nessa etapa, ocorre a adição dos demais insumos ao interior do reator, completando a carga necessária para o início da fermentação.

Figura 34 – Segundo carregamento como operação no fermentador.



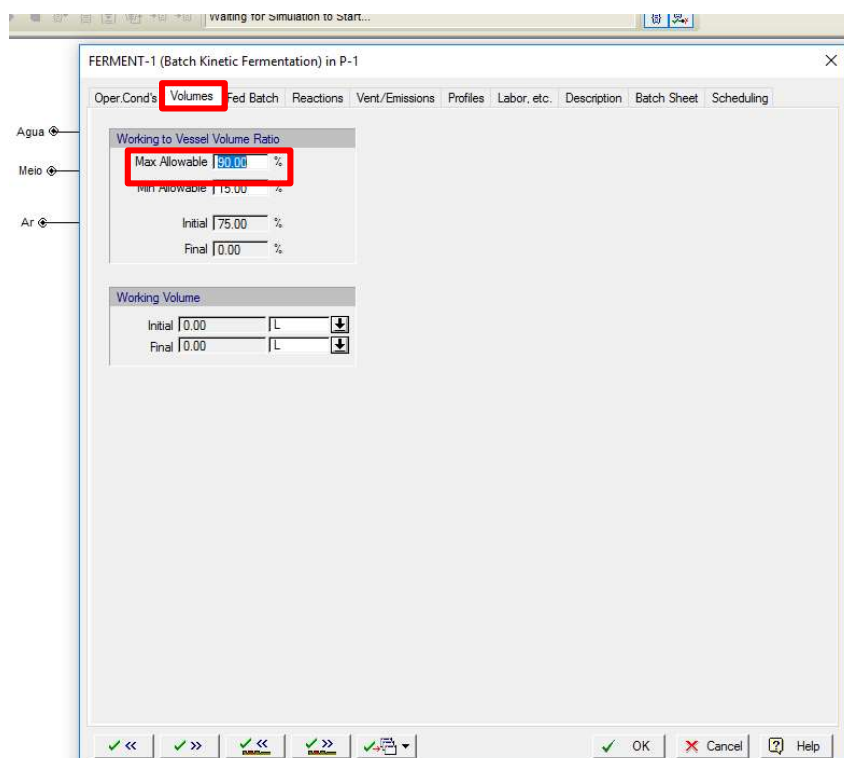
Em seguida, é a vez de configurar o aquecimento como mostrado na Figura 24.

Figura 35 - Configuração da operação de aquecimento do fermentador.



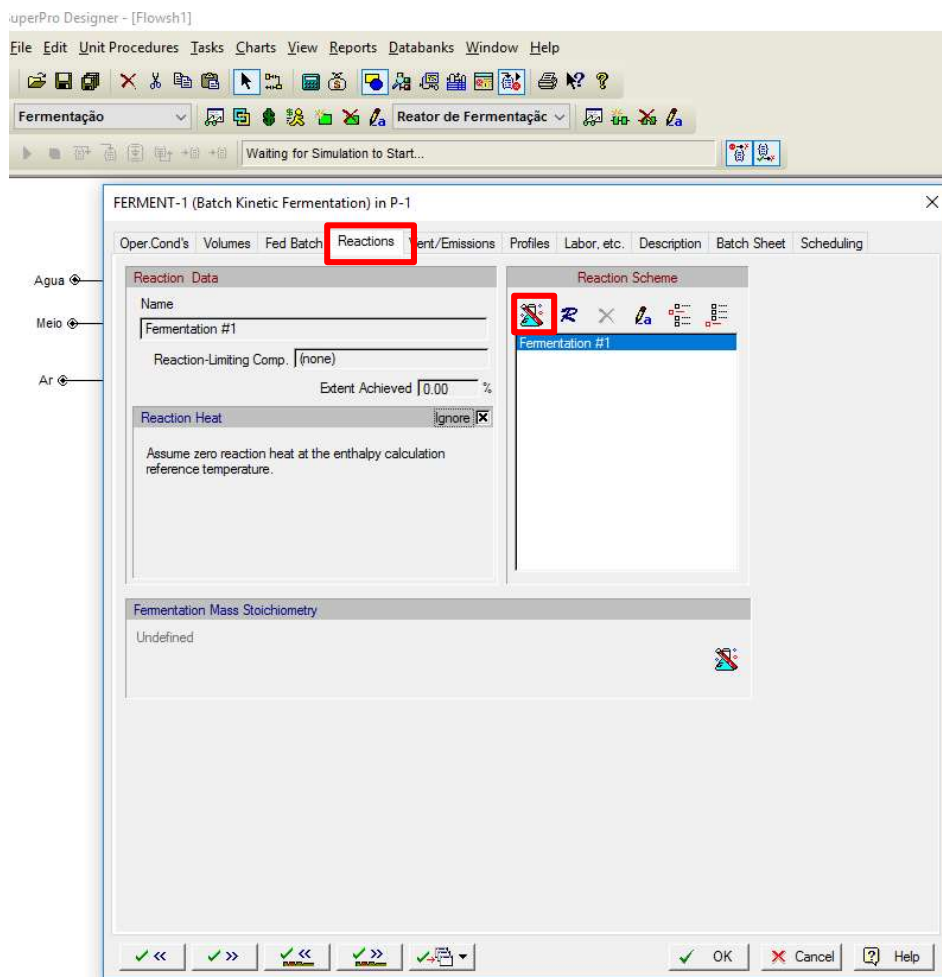
Depois do aquecimento, vem o processo de fermentação. Primeiramente, iremos configurar o volume do reator conforme as instruções da Figura 25 .

Figura 36 – Configuração do volume da operação de fermentação no reator.



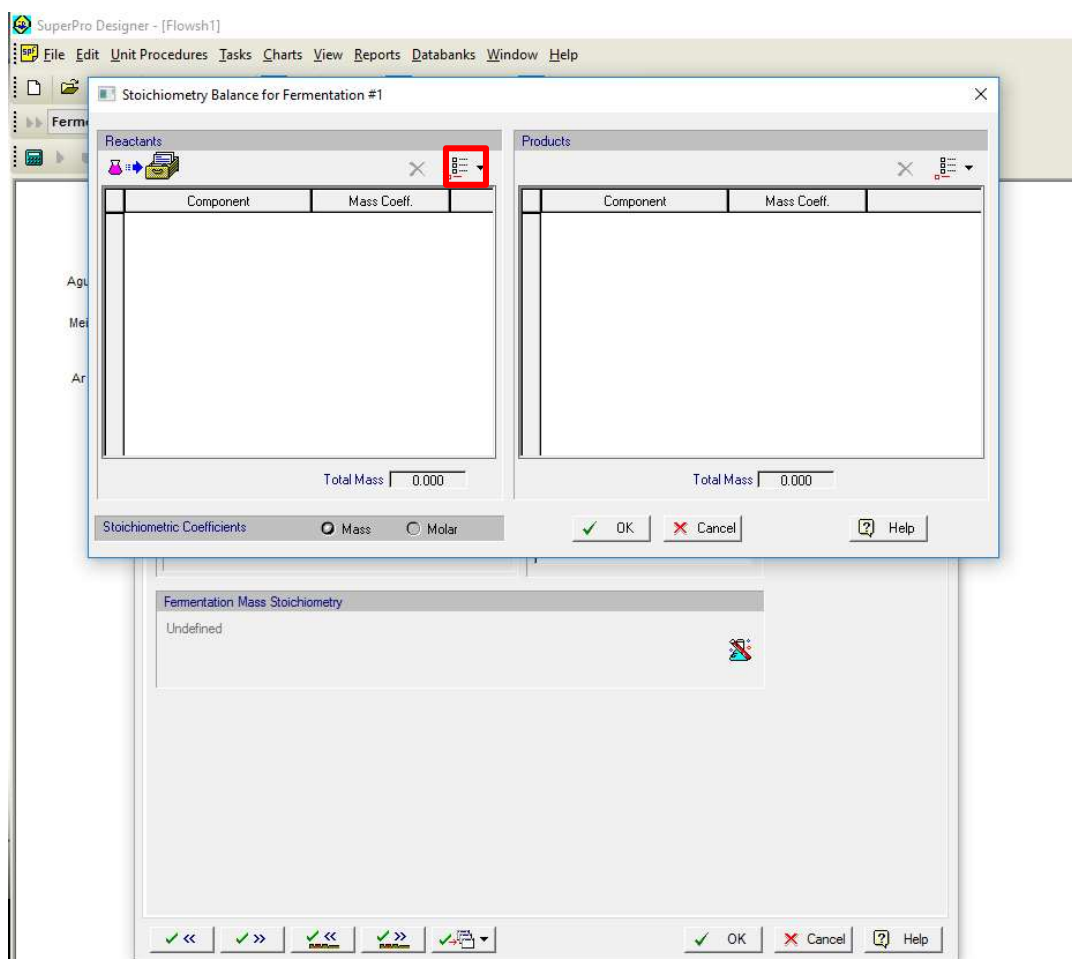
A próxima etapa é configurar a reação que acontecerá no fermentador clicando nos ícones destacados que aparecem na Figura 26.

Figura 37 - Iniciando a configuração da reação que acontece dentro da operação de fermentação.



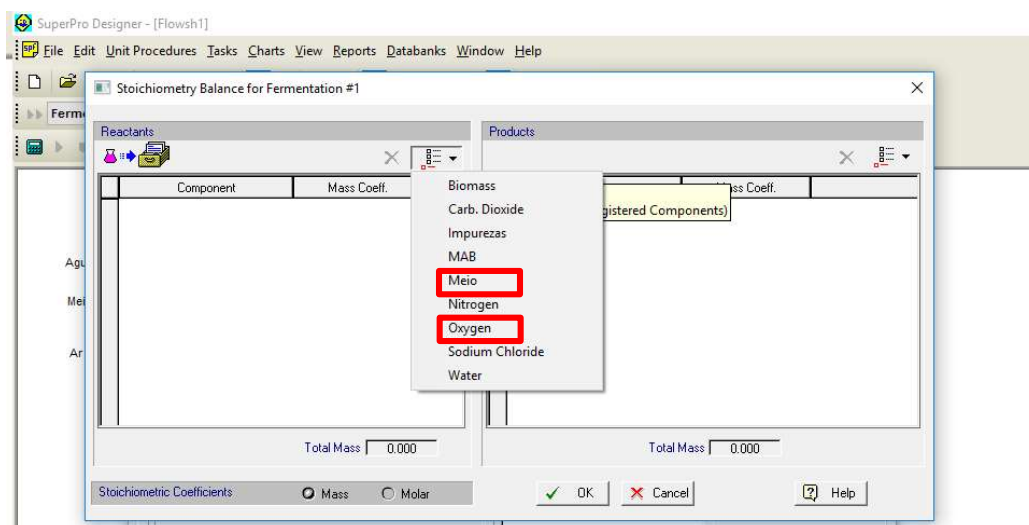
Uma janela será aberta dividindo em dois quadros (Figura 27). Clique no quadro vermelho indicado para adicionar os componentes que farão parte dos reagentes.

Figura 38 - Adicionando os reagentes na reação de fermentação.



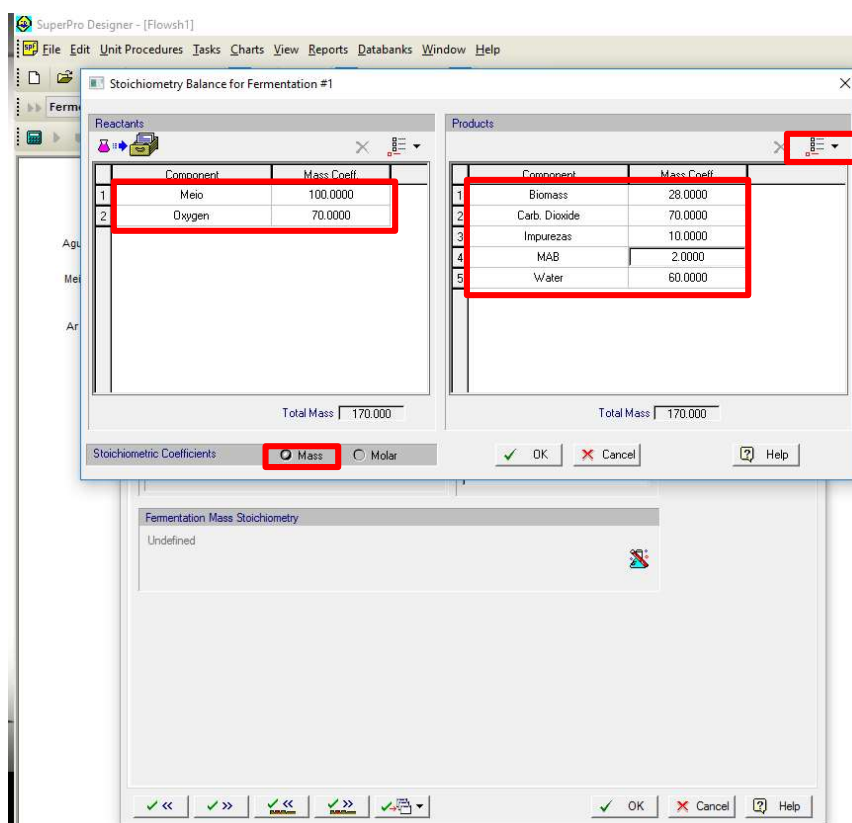
Selecione o meio e oxigênio no lado dos reagentes do modo que é apresentado na Figura abaixo.

Figura 39 - Selecionando os componentes que atuarão como reagentes na fermentação.



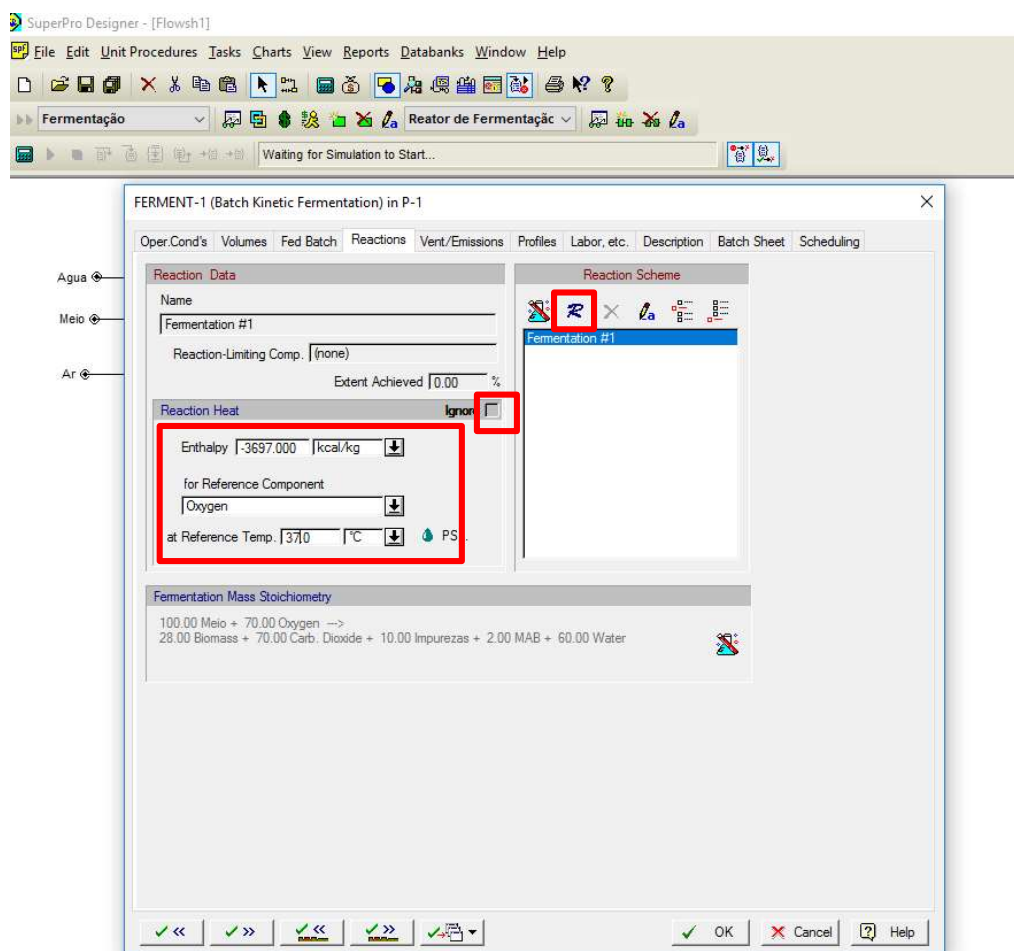
Clique no ícone para adicionar os componentes do produto da reação de fermentação (Figura 29). Preencha os campos de “Mass Coef.” de acordo com a estequiometria da reação na Equação 1.

Figura 40 - Preenchimento dos coeficientes dos reagentes e dos produtos segundo a estequiometria da reação.



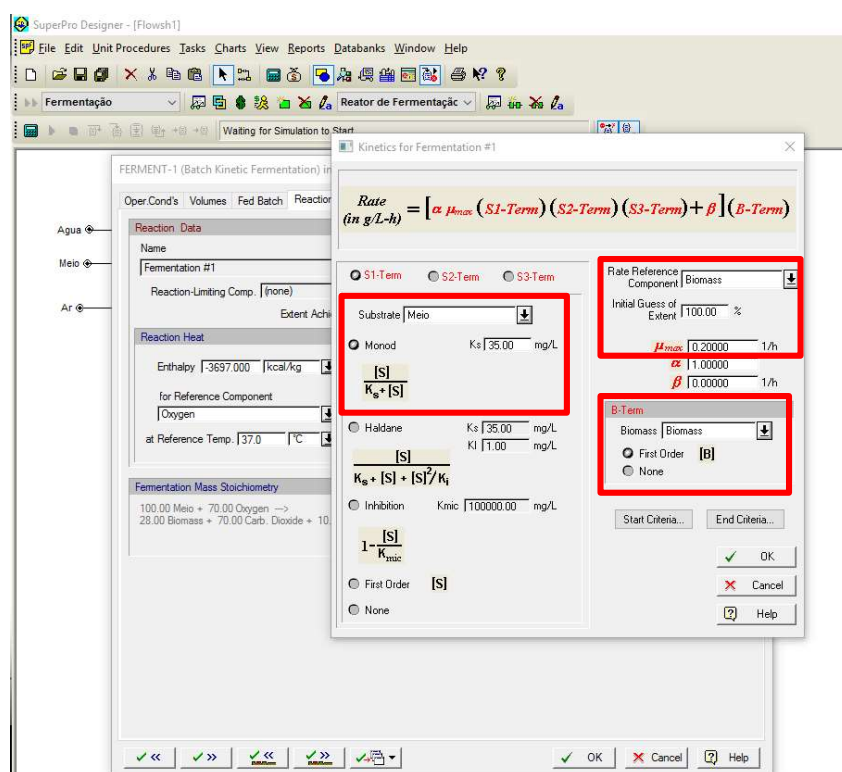
Na Figura 30, clique na caixa “Ignore” e adicione as informações termodinâmicas como estão descritas. Em seguida, clique na letra “R” indicada no quadro vermelho no lado direito do quadro.

Figura 41 - Preenchimento das informações termodinâmicas da reação.



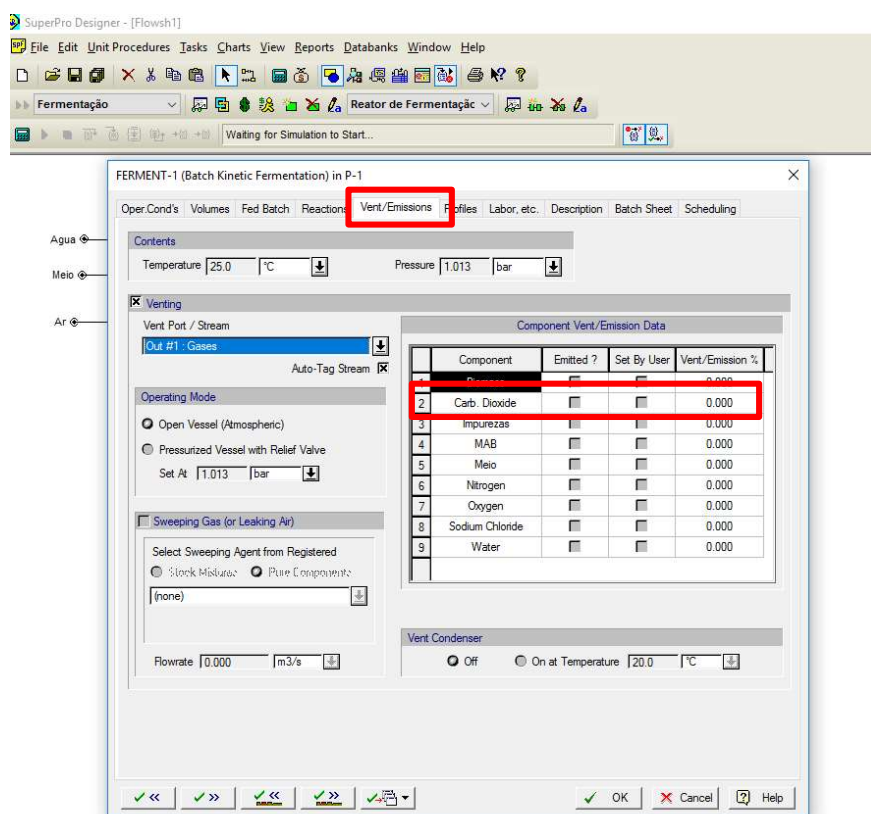
Ao clicar em “R”, é possível selecionar o modelo cinético da reação de fermentação, conforme ilustrado na Figura 31. Em seguida, selecione a corrente “Meio” e escolha o modelo cinético de Monod, o qual descreve o crescimento microbiano em função da concentração do substrato. Por fim, preencha os campos dos quadros destacados com as informações correspondentes aos parâmetros do modelo.

Figura 42 - Inserindo os parâmetros cinéticos da reação de fermentação.



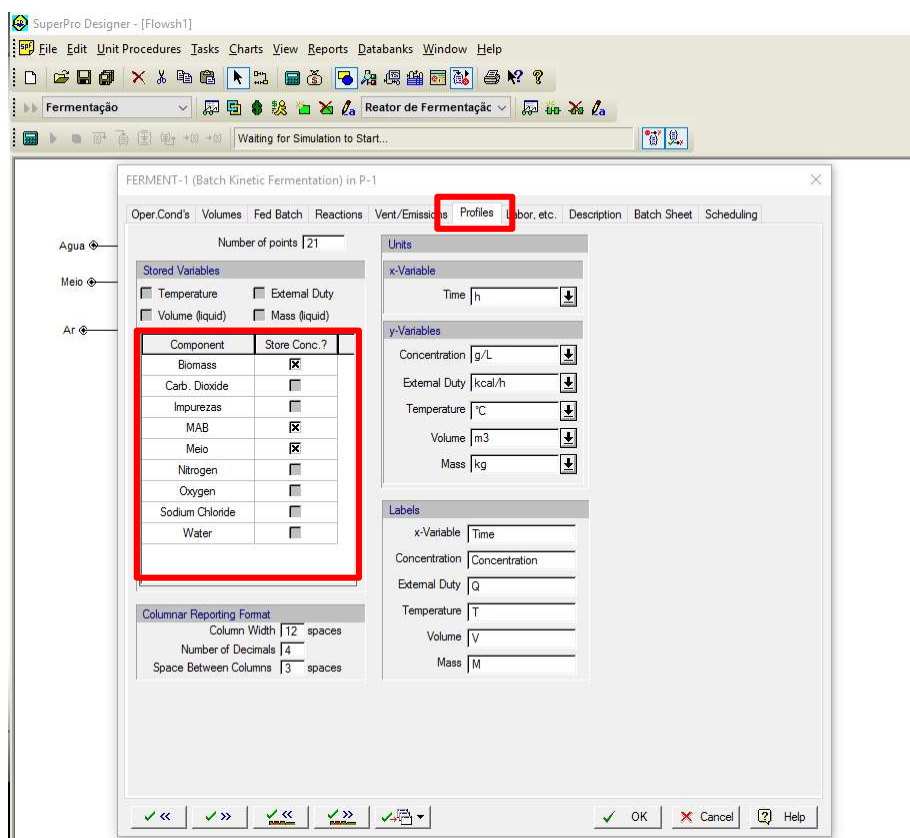
Ainda na janela de configuração da operação de fermentação, acesse a aba “Vent / Emissions” e selecione a corrente de saída denominada “Gases”. Em seguida, no quadro adjacente, escolha a opção “Carb. Dioxide”, definindo essa corrente como a via de liberação do gás carbônico gerado durante a fermentação (ver Figura 32).

Figura 43 - Configuração do produto gasoso de saída do reator.



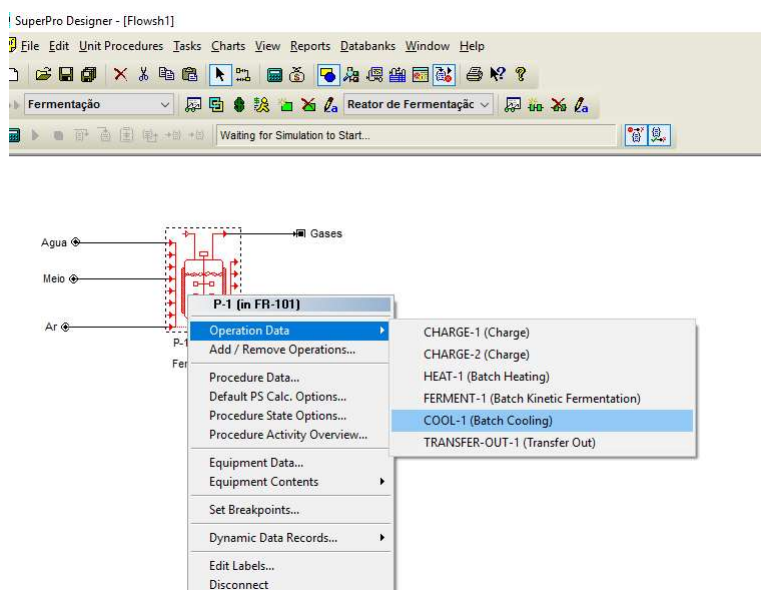
Na aba “Profiles” do reator biológico FERMENT-1 no SuperPro Designer, define-se as variáveis que serão monitoradas e registradas ao longo do tempo durante a simulação da fermentação descontínua. Nessa configuração da Figura 33, foram selecionados 21 pontos de registro, permitindo a geração de perfis temporais. As variáveis acompanhadas são as concentrações de biomassa, MAB e meio, tendo o tempo (h) como eixo x e, no eixo y, concentração (g/L), temperatura (°C) e volume (m³). Dessa forma, a simulação é direcionada para a análise da cinética de crescimento celular, do consumo do substrato e da formação do produto ao longo da batelada.

Figura 44 - Interface de seleção de variáveis operacionais no SuperPro Designer, destacando a coleta de dados de concentração (g/L), volume (m³) e temperatura (°C) durante o tempo de batelada.



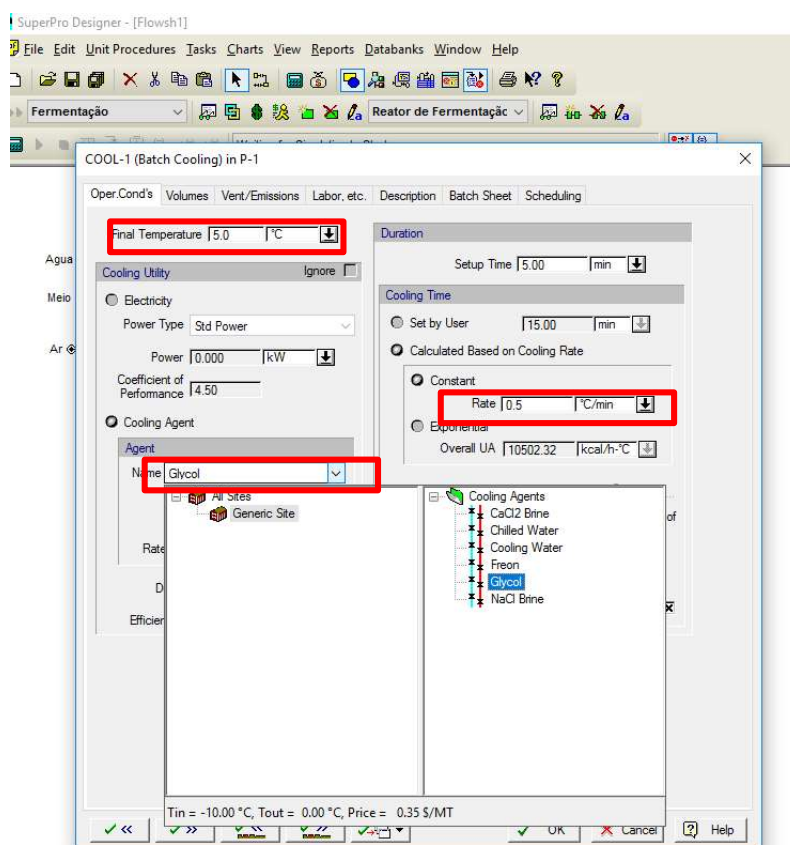
A próxima etapa é configurar o processo de resfriamento do reator de fermentação clicando com o botão direito do mouse e selecionando “Operation Data” e depois “COOL-1” como é mostrado da Figura 34.

Figura 45 - Iniciando a operação de resfriamento do fermentador.



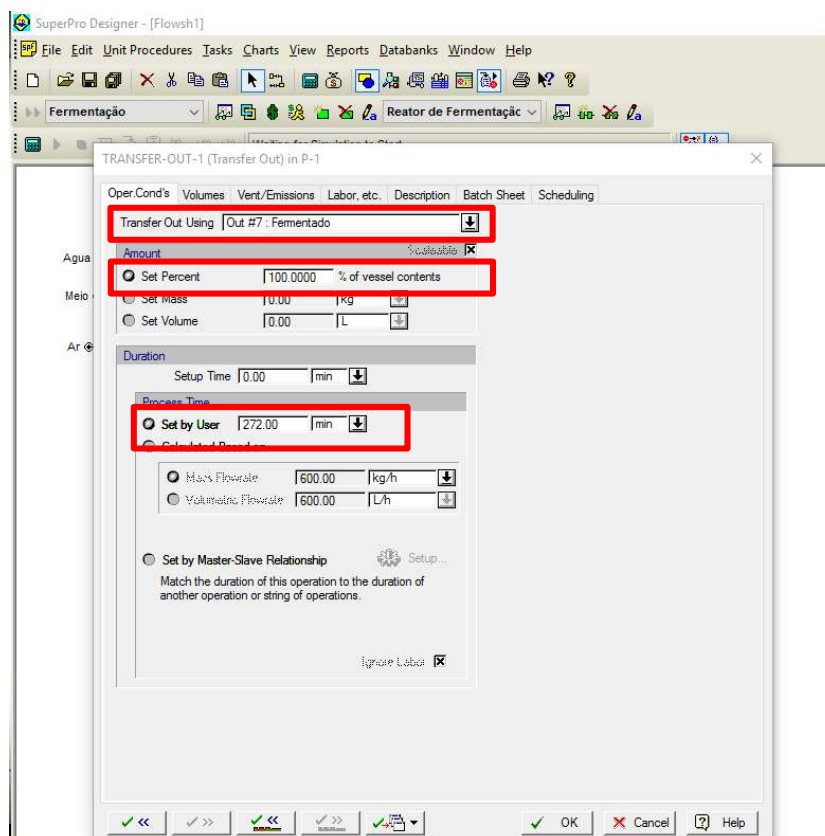
Defina as condições que são apresentadas na Figura 35. A temperatura final é de 5 °C e o fluido refrigerante será o glicol. O processo de resfriamento acontecerá numa taxa de 0,5 °C/min.

Figura 46 - Configurando a operação de resfriamento do fermentador.



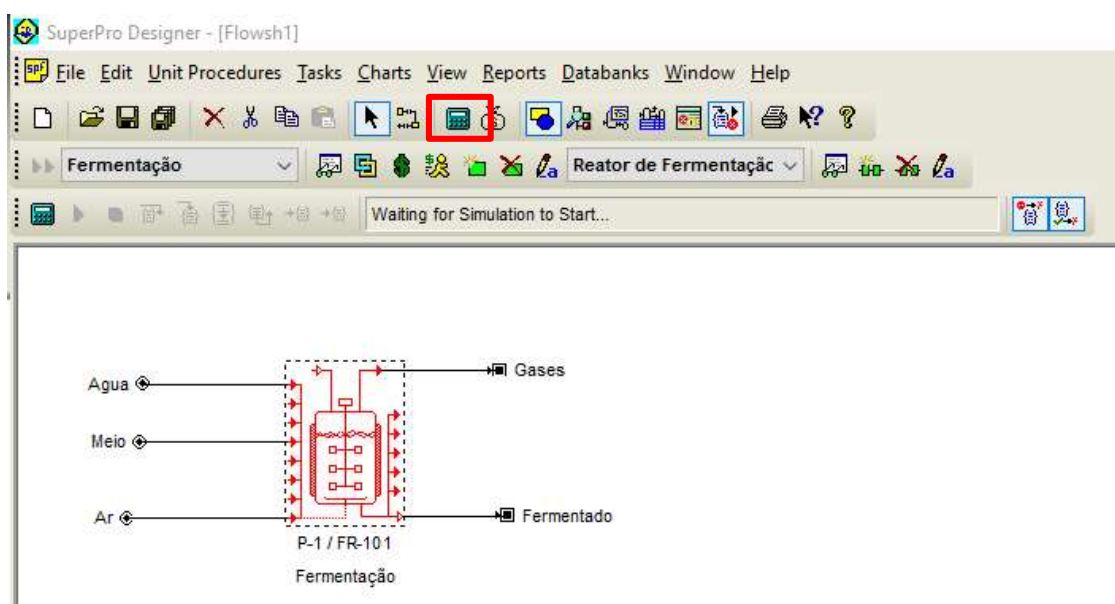
Para finalizar a configuração das operações realizadas no fermentador, deve-se definir o procedimento de transferência. Para isso, clique com o botão direito do mouse e selecione a operação “TRANSF-OUT-1”. A janela que será aberta deve ser preenchida com os mesmos valores apresentados na Figura 36.

Figura 47 - Configurando a operação de transferência do reator.



Após a conclusão de todas as etapas anteriores, a simulação estará pronta para ser executada. Para iniciar o cálculo, clique no ícone da calculadora destacado pelo quadro vermelho na figura abaixo e o programa então executará o processo conforme as configurações estabelecidas.

Figura 48 - Executando a simulação da fermentação.



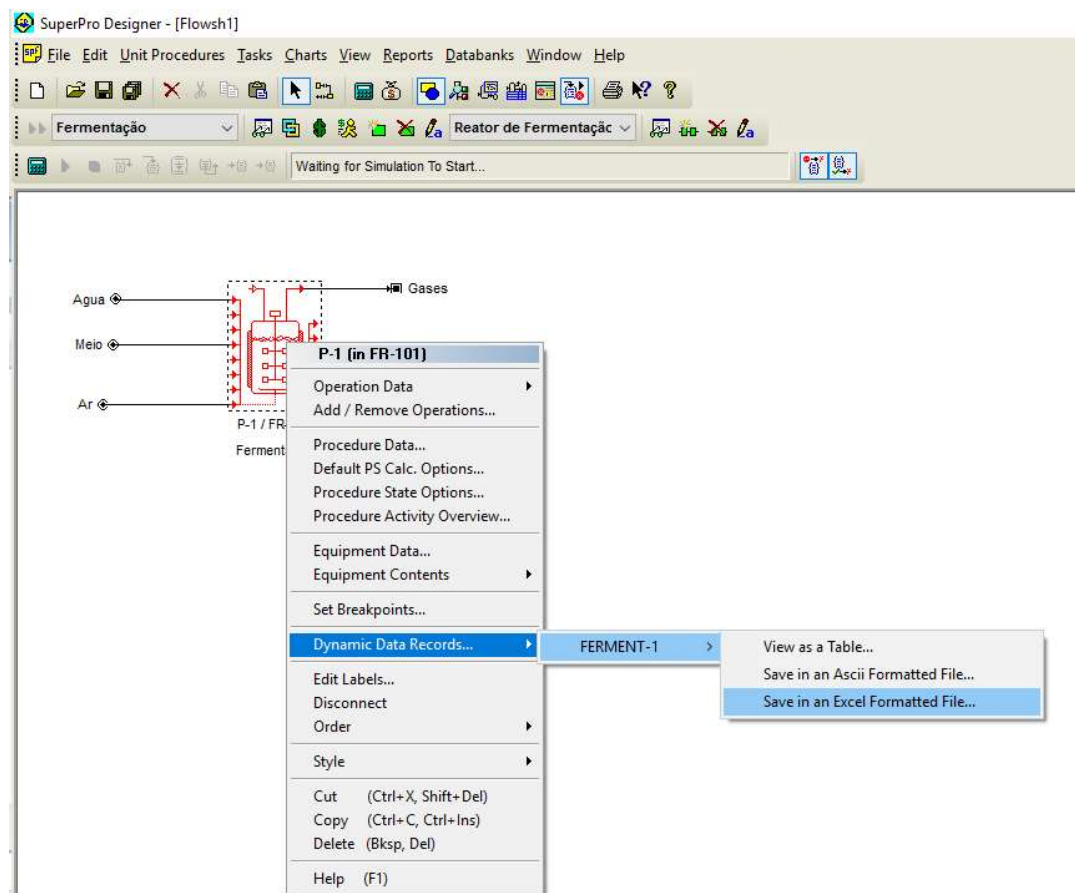
Se todos os parâmetros foram selecionados e configurados corretamente, uma mensagem no final da tela deverá aparecer informando que o balanço de massa e energia foram concluídos com sucesso (Figura 37).

Figura 49 - Mensagem que deve aparecer informando que a simulação foi concluída sem erros.



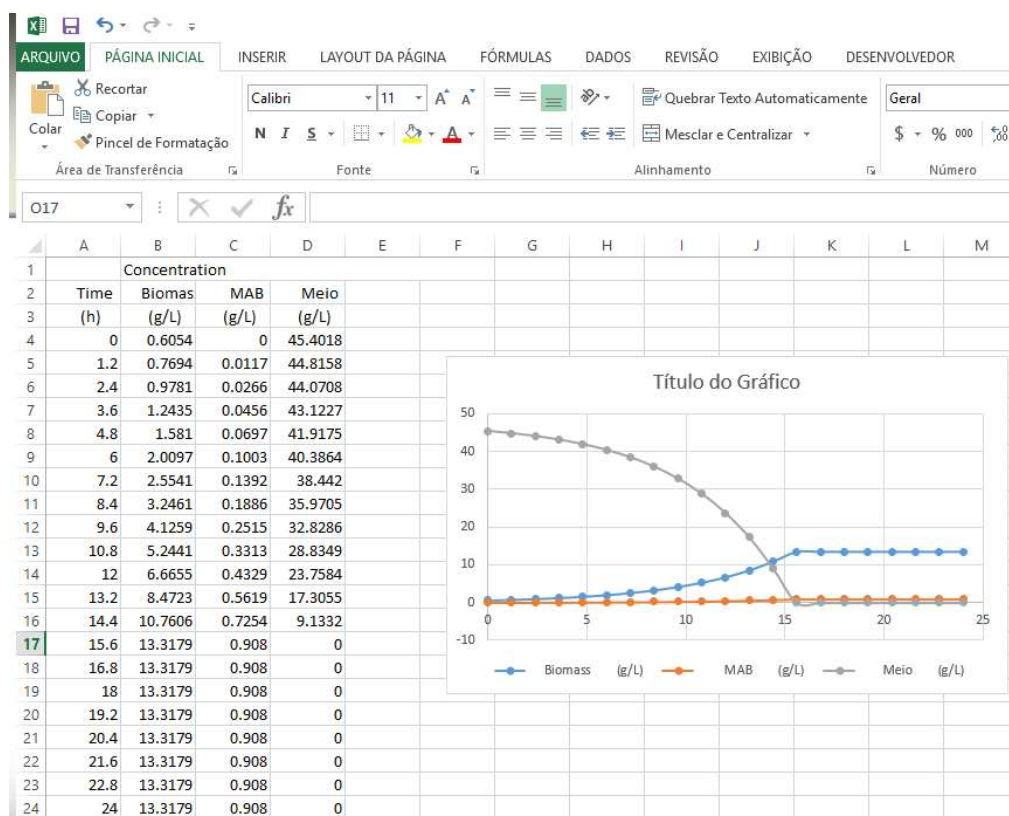
Depois da simulação ter sido executada, é possível obter os dados que foram configurados na Figura 33. Proceda da mesma forma que está descrito na Figura abaixo.

Figura 50 - Exportando os dados da fermentação em formato de planilha.



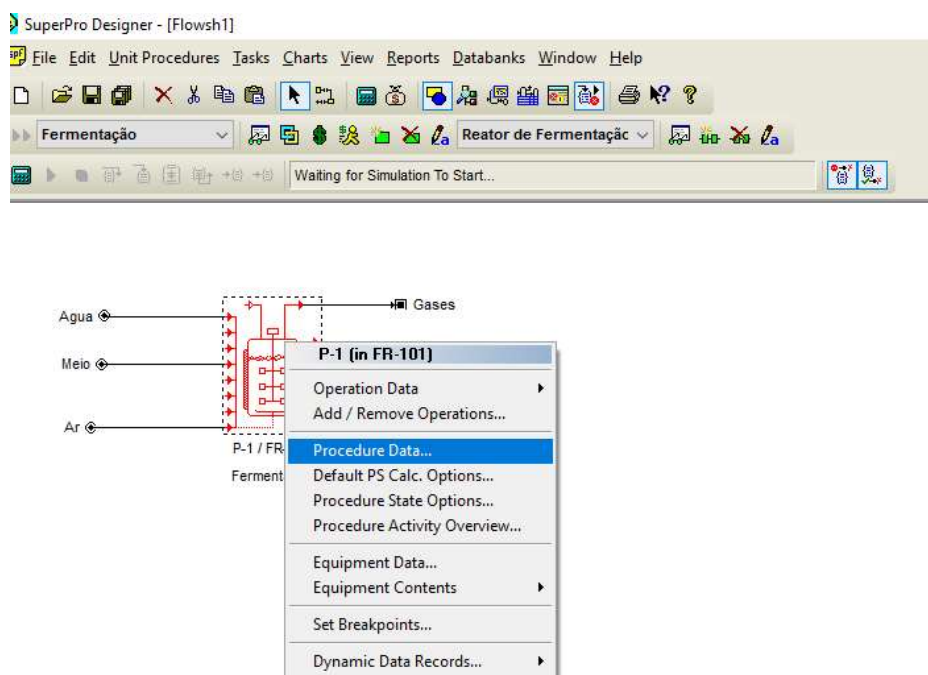
Com os dados obtidos, pode-se plotar um gráfico no Excel como é ilustrado na Figura 40 que mostra a evolução da geração de biomassa em função do consumo do meio.

Figura 51 - Gráfico da evolução da reação de fermentação em função dos componentes que são consumidos e formados.



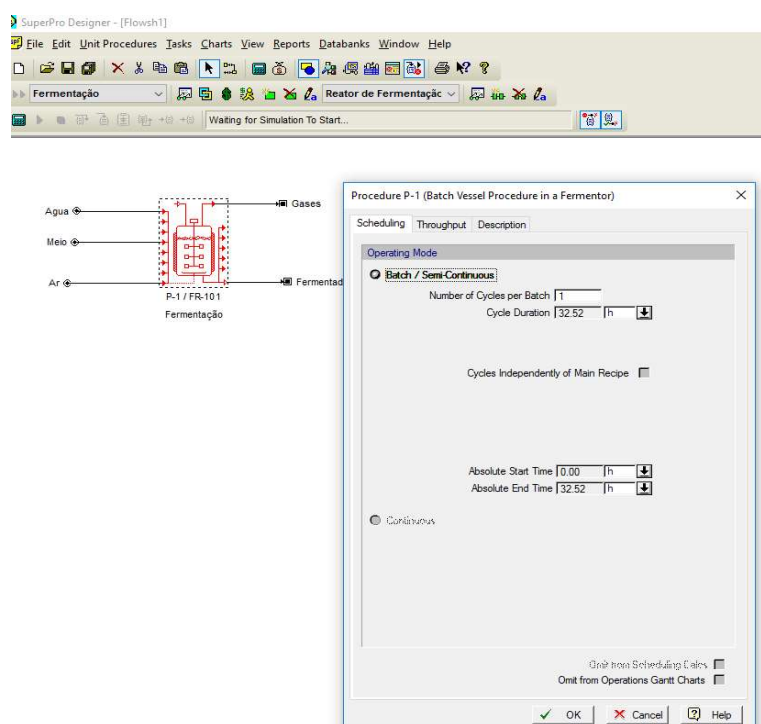
Para se ter conhecimento do tempo de duração de todo o processo de fermentação que foi simulado em todas as suas etapas, basta clicar com o botão direito do mouse sobre o reator e em seguida em “Procedure Data” como mostrado na Figura 41.

Figura 52 - Procedimento para obter o tempo do processo da simulação completa da fermentação.



Ao realizar esse procedimento, verifica-se que o tempo total do procedimento em batelada foi de 32,52 h de duração como é apresentado na Figura 42.

Figura 53 - Resultado do tempo total da simulação do procedimento de fermentação.



Além disso, é possível obter um relatório completo de todas as correntes e materiais utilizados na simulação seguindo o procedimento apresentado na Figura 43. O menu Reports reúne todos os relatórios usados para analisar, documentar e validar o processo simulado. Nele é possível gerar relatórios de balanço de massa, equipamentos, avaliação econômica, produtividade, impacto ambiental, emissões, custos detalhados, além de dados de CIP/SIP e parâmetros de entrada da simulação. O menu também permite visualizar relatórios, salvá-los, exportar para Excel e gerar a Batch Sheet, que descreve a sequência operacional do processo.

Figura 54 - Menu Reports do SuperPro Designer, destacando as opções de geração de relatórios técnicos, econômicos, ambientais e operacionais do processo de fermentação simulado.

