



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
CURSO DE ENGENHARIA QUÍMICA

LUCAS RYHAN FORMIGA CAMINHA

**DESENVOLVIMENTO DE UM REATOR AUTOMATIZADO EM ESCALA DE
LABORATÓRIO DE BAIXO CUSTO MICROCONTROLADO POR ESP32**

JOÃO PESSOA

2021

Lucas Ryhan Formiga Caminha

**Desenvolvimento de um reator automatizado em escala de laboratório de baixo custo
microcontrolado por ESP32**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Química do Centro de Tecnologia (CT) da Universidade Federal da Paraíba (UFPB), como requisito para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Química.

Orientador(a): Prof. Dr. Giovanilton Ferreira Da Silva

JOÃO PESSOA

2021

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

C183d Caminha, Lucas Ryhan Formiga.
DESENVOLVIMENTO DE UM REATOR AUTOMATIZADO EM ESCALA
DE

LABORATÓRIO DE BAIXO CUSTO MICROCONTROLADO POR ESP32 /
Lucas Ryhan Formiga Caminha. - João Pessoa, 2021.
56 f. : il.

Orientação: Giovanilton Ferreira Da Silva Silva.
TCC (Graduação) - UFPB/CT.

1. reatores químicos. 2. automação. 3. IoT. I. Silva,
Giovanilton Ferreira Da Silva. II. Título.

UFPB/BS/CT

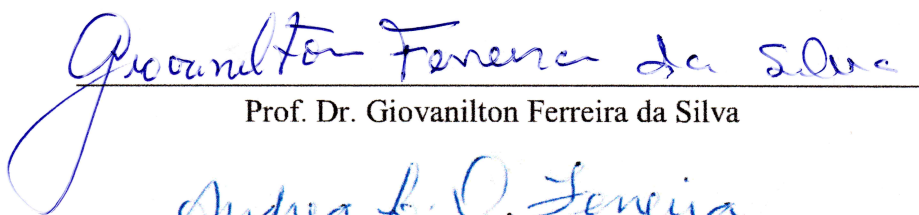
CDU 66.02(043.2)

LUCAS RYHAN FORMIGA CAMINHA

DESENVOLVIMENTO DE UM REATOR AUTOMATIZADO EM ESCALA DE
LABORATÓRIO DE BAIXO CUSTO MICROCONTROLADO POR ESP32

Trabalho Final de Curso apresentado à
Coordenação do Curso de Engenharia Química
da Universidade Federal da Paraíba como
requisito parcial para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Química.

APROVADO EM: 01-12-2021.



Prof. Dr. Giovanilton Ferreira da Silva



Profa. Dra. Andrea Lopes de Oliveira Ferreira



Tássio Max dos Anjos Martins

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por ter me concedido o dom da vida e me permitido entender um pouco do comportamento natural de sua criação e as leis que regem a natureza, também por ter segurado a minha mão quando eu mais precisei, por ter me dado força, coragem e pessoas que me ajudassem a suportar este fardo e por sempre me guardar dos perigos.

Em segundo lugar, agradeço os meus pais, Vicente Carlos Gama Caminha e Zuleide Formiga Pereira Caminha, por serem a minha base, me apoiarem, me dado suporte e estarem comigo nos melhores e piores momentos da minha vida, sem vocês eu não teria conseguido e não seria nada.

Também agradeço a todos os meus familiares, em especial Ananda Formiga, Fernanda Formiga, Maria Gorete, Maria das Graças e Zuleneide Formiga, que me ajudaram e me acolheram desde o início da minha graduação e sem os quais não teria conseguido me manter em outra cidade. A vocês minha eterna gratidão.

Ao Prof. Dr. Giovanilton Ferreira da Silva, pela orientação, auxílio e suporte, para o desenvolvimento e conclusão de curso, bem como todos os ensinamentos transmitidos. Como também aos demais professores e servidores do DEQ e de toda a UFPB pela ajuda recebida sempre que necessário.

E a todos que, de alguma forma, estiveram ao meu lado durante este período e em todos os outros de minha vida, por terem me ajudado direta ou indiretamente e por acreditarem em mim. Levarei vocês sempre comigo.

*“Quanto mais eu estudo a natureza, mais me
maravilho com a obra do Criador.”*

Louis Pasteur

RESUMO

O projeto de reatores químicos é uma das principais áreas de trabalho na engenharia química. O reator químico é um recipiente onde ocorrem reações químicas, transferências de massa e calor. O projeto de um reator químico trata com múltiplos aspectos de engenharia química, sobre os quais os engenheiros químicos trabalham para obter a maximização de produtos para a reação dada. Existem diversos tipos de reatores químicos, dentre eles os principais são os reatores em batelada, no qual assume-se que não há entrada ou saída de material e que o reator está bem misturado. Reatores do tipo CSTR (*Continuous Stirred Tank Reactors*) que são constituídos de tanques de agitação interligados em série sendo um processo contínuo. Outro reator importante é o reator de fluxo em pistão (PRF), no qual a mistura reacional passa continuamente por um reator tubular. O presente trabalho teve como objetivo desenvolver um reator químico em escala de laboratório implementando estratégia de automação e controle. A utilização de uma interface homem-máquina proporciona ao processo um melhor monitoramento e otimização. O microcontrolador utilizado foi o ESP32, que é o responsável pela aquisição de dados em tempo real dos sensores e pelo controle do aquecimento do reator através da técnica de controle PID, os quais podem ser gerenciados pela dashboard da plataforma Arduino IOT Cloud. A montagem do reator em escala de laboratório foi realizada com sucesso sem maiores percalços. Em seguida foi realizado um teste de validação para que o reator seja considerado funcional. O teste foi realizado com água, a agitação e a temperatura do reator foram controladas. Os resultados demonstram que o reator é funcional devido não haver gradiente de temperatura considerável.

Palavras-chave: Reatores químicos. Automação. IoT.

ABSTRACT

The design of chemical reactors is one of the main areas of work in chemical engineering. The chemical reactor is a vessel where chemical reactions, mass and heat transfers take place. The design of a chemical reactor deals with multiple aspects of chemical engineering, which chemical engineers work on to obtain the maximization of products for the given reaction. There are several types of chemical reactors, among them the main ones are the batch reactors, in which it is assumed that there is no input or output of material and that the reactor is well mixed. CSTR (Continuous Stirred Tank Reactors) type reactors that are made up of agitation tanks interconnected in series being a continuous process. Another important reactor is the piston flow reactor (PRF), in which the reaction mixture continuously passes through a tubular reactor. The present work had as objective to develop a chemical reactor in laboratory scale implementing automation and control strategy. The use of a human-machine interface provides the process with better monitoring and optimization. The microcontroller used was the ESP32, which is responsible for real-time data acquisition from the sensors and for controlling the reactor heating through the PID control technique, which can be managed by the dashboard of the Arduino IOT Cloud platform. The assembly of the reactor on a laboratory scale was carried out successfully without major problems. Then, a validation test was performed so that the reactor is considered functional. The test was carried out with water, agitation and reactor temperature were controlled. The results demonstrate that the reactor is functional because there is no considerable temperature gradient.

Keywords: Chemical reactors. Automation. IoT.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Ilustração de um reator do tipo batelada	17
Figura 2 – Reator Contínuo de Tanque Agitado.....	17
Figura 3 – Esquema de um reator de fluxo contínuo.....	19
Figura 4 – Esquema de um Sistema de Agitação em um Reator.....	24
Figura 5 – Ilustração das variáveis para dimensionamento de um tanque padrão	25
Figura 6 – Gráfico utilizado no projeto de tanques agitados	26
Figura 7 – Processo de troca de calor em malha aberta.....	28
Figura 8 – Processo de troca de calor em malha fechada	29
Figura 9 – Resposta ao degrau unitário de uma planta	34
Figura 10 – Curva de resposta em forma de S.....	34
Figura 11 – Sistema de malha fechada com um controlador proporcional.....	35
Figura 12 – Oscilação sustentada com período P_{cr} . (P_{cr} é medido em segundos.).....	35
Figura 13 – Representação do Microcontrolador Esp32	38
Figura 14 – Imagem de uma dashboard genérica da plataforma	38
Figura 15 – Tanque utilizado para fabricação do Reator.....	39
Figura 16 – Motor utilizado no sistema de agitação.....	40
Figura 17 – Acoplamento montado no motor.....	40
Figura 18 – Imagem do Acoplador Rígido utilizado	41
Figura 19 – Imagem do Impelidor de pás inclinadas utilizado.....	41
Figura 20 – Sensor de Temperatura DS18B20	42
Figura 21 – Sensor de temperatura NTC 100K 3950	43
Figura 22 – Sensor de pressão modelo USP-G41.....	43
Figura 23 – Sensor de pH modelo PH-4502C	44
Figura 24 – Sensor de nível ultrassônico RS485.....	45
Figura 25 – Sensor de fluxo YF-S201	45
Figura 26 – Sensor de corrente ACS712	46
Figura 27 – Válvula Motorizada Esfera	47
Figura 28 – Válvula Solenóide 1/4”	47
Figura 29 – Válvula Solenóide 3/4”	48
Figura 30 – Montagem do reator	50
Figura 31 – Parte interna do reator	51
Figura 32 – Gráfico demonstrando o controle PID na temperatura do reator.....	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Relações para dimensionamento de um tanque padrão.....	25
Tabela 2 – Nível de agitação	27
Tabela 3 – Regra de sintonia de Ziegler-Nichols baseada na resposta ao degrau da planta (primeiro método)....	35
Tabela 4 – Regra de sintonia de Ziegler-Nichols baseada no ganho crítico K_{cr} e no período crítico P_{cr} (segundo método).....	36
Tabela 5 – Variação da temperatura dos 3 sensores dispostos no reator.....	52

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 OBJETIVOS.....	14
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	15
2.1 REATORES QUÍMICOS.....	15
2.1.1 Reatores em Batelada.....	16
2.1.2 Reator contínuo de tanque agitado	17
2.1.3 Reator tubular de escoamento empistonado	18
2.2 FENÔMENO DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR	20
2.2.1 Condução.....	21
2.2.2 Convecção.....	22
2.3 OPERAÇÕES UNITÁRIAS	23
2.3.1 Características De Um Tanque Com Agitação	24
2.3.2 Configurações E Dimensões Características De Um Tanque Padrão	25
2.3.3 Níveis De Agitação.....	27
2.4 INSTRUMENTAÇÃO E CONTROLE DE PROCESSOS	27
2.4.1 Sistema em Malha Aberta	28
2.4.2 Sistema em Malha Fechada.....	28
2.4.3 Características Gerais De Instrumentos	30
2.4.4 Controle PID.....	32
2.4.5 Regras de sintonia de Ziegler-Nichols para controladores PID.....	33
2.5 INTERNET DAS COISAS	36
2.5.1 Microcontrolador Esp32.....	37
2.5.2 Plataforma Arduino IOT Cloud	38
3 MATERIAIS E MÉTODOS	39
3.1 REATOR QUÍMICO.....	39
3.2 AGITADOR.....	40
3.2.1 Motor.....	40
3.2.2 Caixa De Redução	40
3.2.3 Acoplamento Rígido.....	41
3.2.4 Impelidor de pás inclinadas.....	41
3.3 SENSORES	42
3.3.1 Sensor de Temperatura DS18B20.....	42

3.3.2 Sensor de temperatura NTC 100K 3950	43
3.3.3 Sensor de pressão modelo USP-G41	43
3.3.4 Sensor de pH modelo PH-4502C.....	44
3.3.5 Sensor de nível ultrassônico RS485	44
3.3.6 Sensor de fluxo modelo YF-S201	45
3.3.7 Sensor de corrente ACS712.....	45
3.4 VÁLVULAS	46
3.4.1 Válvula motorizada esfera.....	46
3.4.2 Válvula Solenóide 1/4”	47
3.4.3 Válvula Solenóide 3/4.....	48
3.5 PLATAFORMA DE IoT	48
4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	49
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	50
5.1 MONTAGEM DO REATOR	50
5.2 TESTE DE VALIDAÇÃO	51
6 CONCLUSÃO.....	54
6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	54
REFERÊNCIAS	55

1 INTRODUÇÃO

Uma das principais áreas de trabalho na engenharia química é o projeto de reatores químicos, seja para a ampliação de experimentos de laboratório, para a operação de planta-piloto, ou seja, para a produção em escala real. O reator químico é um recipiente onde ocorrem reações químicas, transferências de massa e calor. O projeto de um reator químico trata com múltiplos aspectos de engenharia química, sobre os quais os engenheiros químicos trabalham para obter a maximização de produtos para a reação dada (SCHMAL, 2010).

Existem diversos tipos de reatores químicos, dentre eles os principais são os reatores em batelada, no qual assume-se que não há entrada ou saída de material e que o reator está bem misturado, reatores do tipo CSTR (*Continuous Stirred Tank Reactors*) que são constituídos de tanques de agitação interligados em série sendo um processo contínuo, por fim, outro reator importante é o reator de fluxo em pistão (PRF), no qual a mistura reacional passa continuamente por um reator tubular (FOGLER, 2018).

Para a maioria das reações de fase líquida, a mudança de densidade com a reação é geralmente pequena e pode ser desprezada. A utilização das técnicas de controle nos processos químicos é de fundamental importância devido às exigências de qualidade que os produtos precisam ter. Portanto, para que as técnicas de controle tenham o resultado esperado, os sensores devem ser utilizados como forma de aquisição de dados em tempo real (RANADE, 2001).

As inovações digitais trazem aos processos fabris uma vasta gama de possibilidades para monitoramento e otimização. As conexões *wireless* transformaram a comunicação entre pessoas e dispositivos, tornando a interface homem-máquina muito mais dinâmica e eficiente. A união desses fatores propiciou a criação de diversos conceitos e ferramentas como Big Data, Internet das Coisas, Computação em Nuvem e Aprendizado de Máquina. Suas aplicações na indústria podem trazer benefícios em segurança, produtividade, custo e impacto ambiental (CARDOSO; CHEBAR; BELTRÃO, 2018).

Existem alguns conceitos-chave no mundo IoT (Internet das Coisas) que o diferenciam de outros tipos de tecnologias (GIUSTO, 2010):

- Conectividade: O dispositivo está conectado à Internet ou a uma rede local.
- Identificação: O dispositivo tem uma identificação única na rede para que os dados tenham um contexto identificado por esse dispositivo. Além disso, o dispositivo está disponível para atualização remota, gerenciamento remoto e diagnósticos.
- Operação autônoma: os sistemas de IoT são projetados para mínima ou nenhuma

intervenção humana. Cada dispositivo coleta dados do ambiente onde está instalado e pode, então, comunicar os dados a outros dispositivos para detectar o status atual do sistema e responder conforme configurado. Essa resposta pode ser na forma de uma ação, um log ou um alerta, se necessário.

- **Interoperabilidade:** os dispositivos em uma solução de IoT conversam entre si, mas não pertencem necessariamente a um único fornecedor. Quando dispositivos projetados por fornecedores diferentes compartilham um protocolo comum, é possível adicionar um novo dispositivo a essa rede heterogênea apenas clicando em alguns botões no dispositivo ou no software de gerenciamento.

- **Escalabilidade:** os sistemas IoT são capazes de escalabilidade horizontal para responder a uma carga de trabalho crescente. Um novo dispositivo é adicionado quando necessário para aumentar a capacidade em vez de substituir o existente por um dispositivo superior (escalabilidade vertical).

- **Segurança:** as soluções IoT podem implementar um conjunto de medidas de segurança que garantem a confidencialidade, integridade e disponibilidade para o processo.

O ESP32 é um microcontrolador que oferece uma plataforma robusta e altamente integrada, que ajuda a atender às demandas contínuas de uso eficiente de energia, design compacto, segurança, alto desempenho e confiabilidade e se destina ao desenvolvimento de projetos de Internet das Coisas (IoT) com Wi-Fi, Bluetooth, gerenciamento de energia e vários outros recursos do sistema. O microcontrolador é responsável pela aquisição de dados dos sensores e pelo controle do aquecimento do reator através da técnica de controle PID (ESPRESSIF, 2021).

1.1 OBJETIVOS

O presente trabalho teve como objetivo o desenvolvimento de um reator químico automatizado de baixo custo utilizando o microcontrolador ESP32.

De forma específica, os objetivos deste trabalho são:

- 1) Desenvolver, em escala laboratorial, um reator químico utilizando um tanque de aço inox;
- 2) Adquirir dados do reator em tempo real através de sensores e controlar a temperatura do reator através do controle PID utilizando o microcontrolador ESP32;
- 4) Enviar e receber dados pela plataforma Arduino IOT Cloud.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 REATORES QUÍMICOS

Os processos químicos industriais são projetados para transformar matérias primas em produtos que possuem um alto valor comercial. Reatores químicos, por sua vez, consistem em equipamentos que processam reações em escala industrial obtendo produtos comercializáveis a partir de matérias primas. Um reator tem uma série de funções às quais deve cumprir com eficiência para que a reação tenha um melhor rendimento. Para Ranade (2001) os reatores devem promover o contato íntimo entre os reagentes afim de que a reação ocorra, além de fornecer um ambiente apropriado em termos de pressão, temperatura, concentração de reagentes, agitação e presença de catalisador durante o tempo necessário para que os reagentes se convertam em produtos.

Segundo Schmal (2010), há uma grande variedade de tipos de reatores dentro da indústria química. Convencionalmente divididos em descontínuos e semicontínuos, ou contínuos. Destaca que os reatores descontínuos, também chamados de reatores batelada, operam em processo de pequena escala e, durante o tempo em que a reação química está se processando, não admitem entrada ou saída de reagentes ou produtos. Os reatores batelada possuem a vantagem de alcançar altas conversões, obtidas deixando os reagentes no reator por um grande período. As desvantagens deste tipo de reator estão relacionadas ao alto custo envolvido e à dificuldade de aplicação a processo de larga escala.

Já em relação aos reatores semicontínuos ou contínuos, aponta que são aplicados a processos em grande escala de produção, normalmente operando em regime estacionário e em condições mais amplas, o que exige controle contínuo de variáveis como vazão, temperatura e concentração, além do regime de escoamento. Fogler (2002) destaca três tipos principais de reatores ideais de escoamento contínuo, o Reator Contínuo de Tanque agitado (*Continuous Stirred-Tank Reactor* - CSTR), o Reator de Leito Fixo (*Packed Bed Reactor* – PBR) e o Reator com escoamento empistonado (*Plug-Flow Reactor* – PFR). Em vista da necessidade de manter produções em fluxo contínuo, que favorecem a larga escala, esses tipos reatores são largamente utilizados pela indústria. Um reator pode ter dois tipos de escoamentos ideais em seu interior. Segundo Levenspiel (1972), a maioria dos projetos de equipamentos utilizam o escoamento empistonado ou o escoamento de mistura perfeita, uma vez que esses escoamentos ideais são de simples tratamento matemático.

2.1.1 Reatores em Batelada

Reatores em batelada são usados para operação em pequena escala, para testar novos processos que não tenham sido desenvolvidos completamente, para fabricação de produtos caros e para processos que sejam difíceis de converter em operações contínuas. O reator é carregado por meio dos orifícios no topo, se houver necessidade, pode ser utilizados camisas de aquecimento ou resfriamento, após o término da reação, o reator é descarregado. Reator em batelada tem a vantagem de altas conversões que podem ser obtidas deixando o reagente no reator por um longo período. Porém ele tem desvantagens tais com alto custo de operação, variabilidade de produtos de batelada em batelada e dificuldade de produção em larga escala (FOGLER, 2018).

Um reator em batelada não tem entrada nem saída de reagentes ou produtos enquanto a reação está sendo realizada: $F_{j0} = F_j = 0$. O balanço molar geral resultante na espécie j é:

$$\frac{dN_j}{dt} = \int^V r_j \cdot dV \quad (1)$$

Se a mistura reacional estiver perfeitamente misturada de modo que não haja variação na velocidade de reação ao longo do volume do reator, podemos tirar r_j da integral, integrar e escrever o equilíbrio molar no formato:

$$\frac{dN_j}{dt} = r_j \cdot V \quad (2)$$

Para uma reação $A \rightarrow B$, conforme a reação prossegue, o número de mols de A diminui e o número de mols de B aumenta. O tempo, t_1 , necessário para reduzir o número inicial de moles de N_{A0} para um número final desejado N_{A1} pode ser obtido pela relação:

$$\frac{dN_A}{dt} = r_A \cdot V \quad (3)$$

Rearranjando,

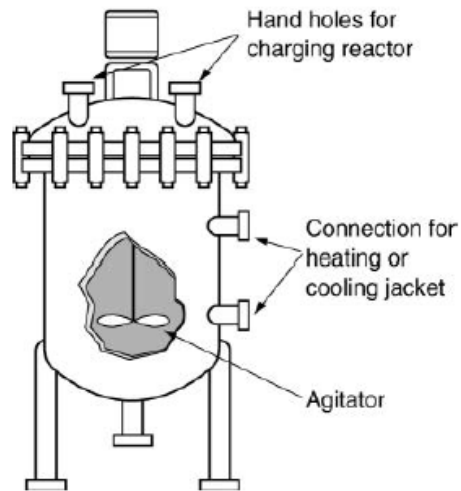
$$dt = \frac{dN_A}{r_A \cdot V} \quad (4)$$

Integrando utilizando os limites $t = 0$, $N_A = N_{A0}$, e $t = t_1$, $N_A = N_{A1}$, obtemos:

$$t_1 = \int_{N_{A1}}^{N_{A0}} \frac{dN_A}{-r_A \cdot V} \quad (5)$$

Esta equação é a forma integral do balanço molar em um reator de batelada. Ela fornece o tempo, t_1 , necessário para reduzir o número de mols de N_{A0} para N_{A1} e para formar N_{B1} mols de B . A Figura 1 representa o esquema de um reator do tipo batelada (FOGLER, 2018).

Figura 1: Ilustração de um reator do tipo batelada

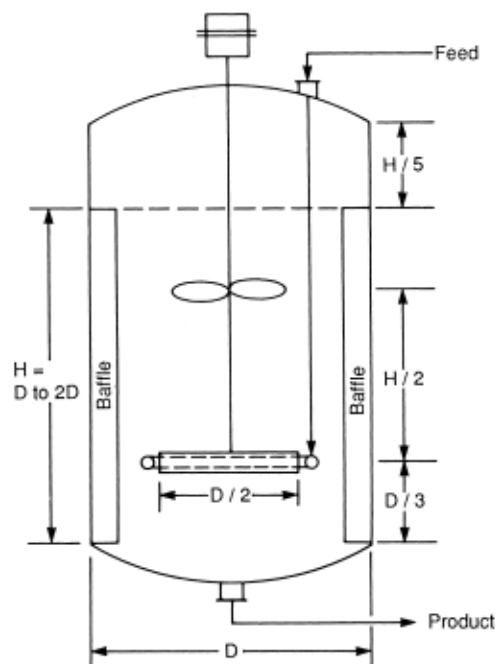


Fonte: Couper (2005).

2.1.2 Reator contínuo de tanque agitado

Um tanque agitado é composto por uma estrutura vertical cilíndrica com um ou mais impelidores e que, com frequência, faz uso de chicanas para evitar a formação de zonas de estagnação (VERGEL, 2013). A Figura 2 representa o desenho esquemático de um reator do tipo CSTR.

Figura 2 - Reator Contínuo de Tanque Agitado



Fonte: Couper (2005).

No reator CSTR o fluido dentro do reator é considerado como sendo perfeitamente

misturado. Os reatores de tanque agitado operam normalmente em regime permanente. Para este tipo de reator, temperatura, concentração ou velocidade de reação são independentes do tempo e da posição (FOGLER, 2018). O uso de impelidores tem a finalidade de criar um fluxo misturado em seu interior, havendo flexibilidade e controle sobre os transportes que ocorrem dentro do reator. A agitação diminui a heterogeneidade, além de promover um contato mais efetivo entre as moléculas de reagente (RANADE, 2001). Para reações de fase líquida o uso de tanques agitados é útil, pois em grande parte dos casos a intensa agitação é necessária à reação. Para um CSTR ideal a probabilidade de uma determinada concentração e temperatura deve ser a mesma em todos os pontos no interior do reator e na corrente de saída (MUSHTAQ, 2014).

Um reator CSTR tem entrada e saída de reagentes ou produtos enquanto a reação está sendo realizada. A equação geral de balanço molar é:

$$F_{j0} - F_j + \int^V r_j \cdot dV = \frac{dN_j}{dt} \quad (6)$$

Aplicando a um reator operado em estado estacionário, ou seja, quando suas condições não variam no tempo, temos que:

$$\frac{dN_j}{dt} = 0 \quad (7)$$

E se não há variações espaciais na velocidade de reação, ou seja, mistura perfeita, temos que:

$$\int^V r_j \cdot dV = V \cdot r_j \quad (8)$$

Então, a equação de projeto para um CSTR adquire a seguinte forma:

$$V = \frac{F_{j0} - F_j}{-r_j} \quad (9)$$

Esta equação fornece o volume V do reator necessário para reduzir a vazão da espécie j que entra, de F_{j0} para a vazão de saída F_j , quando a espécie j está sendo consumida a uma velocidade de $-r_j$. Sabendo que a vazão molar é o produto da concentração da espécie j e a vazão volumétrica v , pode-se reescrever a equação de projeto para obter uma equação de balanço para a espécie A:

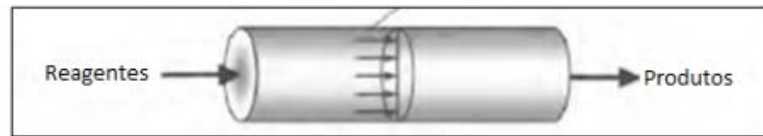
$$V = \frac{v_0 \cdot C_{A0} - v \cdot C_A}{-r_A} \quad (10)$$

2.1.3 Reator tubular de escoamento empistonado

Reatores tubulares são reatores de amplo uso industrial comumente aplicados a reações que se processam em fase gasosa, mas podendo também ser utilizados para reações em fase

líquida. Normalmente consistindo em tubos cilíndricos que operam em estado estacionário, no interior dos quais circula o meio reacional (FOGLER, 2018). Segundo Froment et. al. (1990), um reator tubular de escoamento contínuo é uma imagem simplificada e idealizada do movimento de um fluido, em que todos os elementos de fluidos se movem com uma velocidade uniforme ao longo de linhas de fluxo paralelas. A Figura 3 apresenta o desenho esquemático de um reator de fluxo contínuo.

Figura 3: Esquema de um reator de fluxo contínuo



Fonte: Fogler (2018).

Operando em condições ideais, um elemento de fluido que entra em um reator PFR move-se através dele como um pistão do material, preenchendo a seção transversal do tubo por completo (ISHIDA, 2017).

O reator PFR clássico assume um reator de corpo cilíndrico em que o fluido escoar ao longo do comprimento desenvolvendo um perfil de velocidade plano. O comportamento de um reator tubular ideal prevê que não existem misturas axiais e nem gradientes radiais de temperatura ou concentração (MUSHTAQ, 2014).

Para Schmal (2010, p. 42), em reatores tubulares: O tempo de contato é igual para todas as moléculas ou elementos de fluido ao longo do reator quando a velocidade for uniforme na seção transversal do tubo, satisfazendo assim o escoamento empistonado. Todas as moléculas têm a mesma velocidade. Logo, a concentração é uniforme numa seção transversal do tubo e varia somente ao longo do reator. Este reator será denominado PFR ideal. Para a modelagem de reatores tubulares, uma vez que os reagentes são consumidos à medida em que escoam ao longo do reator, considera-se que há variação da concentração somente ao longo do reator. A velocidade da reação, portanto, torna-se – para reações de ordem diferente de zero – uma função do comprimento do reator (FOGLER, 2013).

Como o Reator Tubular também é um reator contínuo, a equação geral de balanço molar também é dada pela seguinte equação:

$$F_{j0} - F_j + \int_V r_j \cdot dV = \frac{dN_j}{dt} \quad (11)$$

Mas para obter a equação de projeto de um reator PFR no estado estacionário, é necessário fazer o balanço molar para uma espécie j em um segmento diferencial do volume do

reator, dV . Assim o termo de geração ΔG_j fica:

$$\Delta G_j = \int^{\Delta V} r_j \cdot dV = r_j \cdot \Delta V \quad (12)$$

Como o balanço se dá por Entrada – Saída + Geração = Acúmulo, então a equação do balanço pode ser reescrita como:

$$F_{j|V+\Delta V} - F_{j|V} = r_j \cdot \Delta V \quad (13)$$

Tomando o limite quando $\Delta V \rightarrow 0$, obtém-se a forma diferencial do balanço molar em estado estacionário para um reator PFR:

$$\frac{dF_j}{dV} = r_j \quad (14)$$

Para obter o volume V do reator necessário para reduzir a vazão molar de entrada de uma espécie A , de F_{A0} para F_{A1} , basta rearranjar a equação diferencial do balanço molar:

$$V_1 = \int_{F_{A0}}^{F_{A1}} \frac{dF_A}{r_A} = \int_{F_{A1}}^{F_{A0}} \frac{dF_A}{-r_A} \quad (15)$$

2.2 FENÔMENO DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR

Os fenômenos de transporte compreendem três tópicos intimamente relacionados: dinâmica dos fluidos, transferência de calor e transferência de massa. A dinâmica dos fluidos lida com o transporte de momento, a transferência de calor lida com o transporte de energia e a transferência de matéria lida com o transporte de matéria de várias espécies químicas. Porém no presente trabalho, será abordado o tópico de transferência de calor por condução e convecção (BIRD, 2018).

Existem três mecanismos básicos de transferência de calor: condução, convecção e radiação. Condução é a transferência de energia resultante da interação de partículas de maior energia de uma dada substância com partículas adjacentes de menor energia; convecção é o modo de transferência de calor entre uma superfície sólida e o líquido ou gás adjacente que está em movimento e que envolve os efeitos combinados de condução e movimento do fluido; e radiação é a energia emitida pela matéria na forma de ondas eletromagnéticas (ou fótons) resultantes das mudanças nas configurações eletrônicas dos átomos ou moléculas (INCROPERA, 2011).

A definição de calor é uma forma de energia que pode ser transferida de um sistema para outro como consequência da diferença de temperatura entre eles. A transferência de calor é sempre dada do meio de maior temperatura para o de menor temperatura, e ela cessa quando

os dois meios atingem a mesma temperatura.

O Balanço de energia para sistemas fechados, onde a massa é constante, para sistemas estacionários é dado por:

$$E_{ent} - E_{sai} = \Delta U = m \cdot c_v \cdot \Delta T \quad (16)$$

Onde expressamos a variação na energia interna, ΔU , em termos da massa m , do calor específico a volume constante C_v e a variação da temperatura ΔT do sistema. Quando ocorre apenas transferência de calor no sistema sem a ocorrência de trabalho através de suas fronteiras, a relação para o balanço de energia se reduz para:

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot c_v \cdot \Delta T$$

Onde $\dot{Q}$ é a quantidade líquida de transferência de calor para ou do sistema. Esta é a forma de balanço de energia mais usual quando se trata de sistemas de massa fixa moléculas (ÇENGEL, 2009).

Como superfícies não contém volume nem massa, portanto não contém energia. Desta forma, uma superfície pode ser visualizada como um sistema fictício cuja quantidade de energia permanece constante durante um processo (como um sistema estacionário ou com escoamento em regime permanente) (ÇENGEL, 2009). Logo, o balanço de energia em uma superfície pode ser expresso por:

$$\dot{E}_{ent} = \dot{E}_{sai} \quad (18)$$

2.2.1 Condução

Condução é a transferência de energia das partículas mais energéticas de uma substância para as vizinhas menos energéticas como resultado da interação entre elas. A condução pode ocorrer em sólidos, líquidos ou gases (ÇENGEL, 2009).

Em líquidos e gases, a condução deve-se às colisões e difusão das moléculas em seus movimentos aleatórios. Nos sólidos é devido à combinação das vibrações das moléculas em uma rede e a energia é transportada por elétrons livres (INCROPERA, 2011).

A taxa de condução de calor através de um meio depende da geometria deste, sua espessura, o tipo de material e da diferença de temperatura a que o meio está submetido. Considerando a condução de calor em regime permanente através de uma grande parede plana de espessura $\Delta x = L$ e área A , a diferença de temperatura através da parede é $\Delta T = T_2 - T_1$. Experimentos mostram que a taxa de transferência de calor Q através da parede dobra quando a diferença de temperatura ΔT ou a área A normal à direção da transferência de calor também

dobra, mas é reduzida à metade quando a espessura da parede L é dobrada. Assim, concluímos que a taxa de condução de calor através de uma camada plana é proporcional à diferença de temperatura através da camada e à área de transferência de calor, mas inversamente proporcional à espessura da camada (ÇENGEL, 2009). Com isso podemos obter uma relação de transferência de calor:

$$\dot{Q}_{cond} = k \cdot A \cdot \frac{T_1 - T_2}{\Delta x} = -k \cdot A \cdot \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (19)$$

onde a constante de proporcionalidade k é a condutividade térmica do material, que é a medida da capacidade do material de conduzir calor. Quando o limite de $\Delta x \rightarrow 0$, equação acima se reduz à forma diferencial,

$$\dot{Q}_{cond} = -k \cdot A \cdot \frac{dT}{dx} \quad (20)$$

Que é denominada Lei de Fourier da condução térmica em referência a J. Fourier, que a expressou pela primeira vez em seu livro sobre transferência de calor em 1822. O termo dT/dx é o gradiente de temperatura, que é a inclinação da curva no gráfico $T-x$ (a taxa de variação de T com relação a x) na coordenada x . A relação acima indica que a taxa de condução de calor em dada direção é proporcional ao gradiente de temperatura naquela direção. O calor é conduzido no sentido da temperatura decrescente e o gradiente de temperatura toma-se negativo quando a temperatura decresce com o aumento de x . O sinal negativo na Equação 20 assegura que a transferência de calor no sentido positivo de x seja uma quantidade positiva. A área de transferência de calor A é sempre perpendicular à direção da transferência de calor (ÇENGEL, 2009).

2.2.2 Convecção

Convecção é o modo de transferência de energia entre uma superfície sólida e uma líquida ou um gás adjacente, que está em movimento e que envolve os efeitos combinados de condução e de movimento de um fluido. Quanto mais rápido o movimento do fluido, maior será a transferência de calor por convecção (INCROPERA, 2011).

Na ausência de qualquer movimento de uma massa de fluido, a transferência de calor entre uma superfície sólida e o fluido adjacente é por pura condução. A presença de movimento de uma massa de fluido aumenta a transferência de calor entre eles, mas isso também dificulta a determinação das taxas de transferência de calor (ÇENGEL, 2009).

A taxa de transferência de calor por convecção é proporcional à diferença de

temperatura, e sendo convenientemente expressa pela lei de Newton do resfriamento como:

$$\dot{Q}_{conv} = h \cdot A_s \cdot (T_s - T_{\infty}) \quad (21)$$

Onde, h é o coeficiente de transferência de calor por convecção, A_s é a área da superfície através da qual a transferência de calor por convecção ocorre, T_s é a temperatura da superfície, e T_{∞} é a temperatura do fluido suficientemente longe da superfície. Na superfície, a temperatura de um fluido é igual à temperatura da superfície sólida (ÇENGEL, 2009).

O coeficiente de transferência de calor por convecção h não é uma propriedade do fluido. É um parâmetro determinado experimentalmente, cujo valor depende de todas as variáveis que influenciam a convecção, tais como a geometria da superfície, a natureza do movimento do fluido, as propriedades do fluido e a velocidade da massa de fluido (ÇENGEL, 2009).

2.3 OPERAÇÕES UNITÁRIAS

Os processos de fabricação da Indústria Química são constituídos de vários processos de separação, em que o objetivo principal é processar uma determinada matéria-prima para se obter um certo produto de interesse, de forma econômica, segura e em escala industrial. Os processos de separação são variados e a seleção do processo mais adequado para um determinado tratamento depende das características da matéria-prima a ser tratada e produto final (principalmente, o grau de pureza pretendido para a corrente de saída) (MCCABE, 1993).

Dentro de uma indústria química, o processamento tem por base uma conversão química ou uma modificação física. Seja qual for a natureza da transformação, química e/ou física ou biológica, é preciso compreender a natureza de um processo produtivo (Shereve e Brink, 1977). Em 1915, o Engenheiro Arthur Dehon Little estabeleceu o conceito de “Operação Unitária”, segundo o qual: “Operação Unitária é toda a unidade do processo onde os materiais sofrem alterações no seu estado físico ou químico e que pode ser projetada com base em princípios físico-químicos comuns”.

O conceito de Operações Unitárias evoluiu para representar processos em que estejam envolvidos essencialmente fenômenos físicos. Embora, na prática, seja muito difícil separar a ocorrência de reações químicas simultaneamente aos fenômenos físicos (MCCABE, 1993). Ocorrem diversas Operações Unitárias nos processos de fabricação, mas existem quatro grandes grupos, baseados em seus princípios físico-químicos:

- Operações baseadas em Transferência da Quantidade de Movimento (Escoamento em

tubulações, Mistura de Fluidos, Sedimentação, Flotação, Decantação, Filtração, Centrifugação, Fluidização, Separação por ciclones, Precipitação eletrostática, etc.);

- Operações baseadas em Transferência de Massa (Absorção, Adsorção, Extração líquido-líquido, Lixiviação, Troca iônica, etc.);

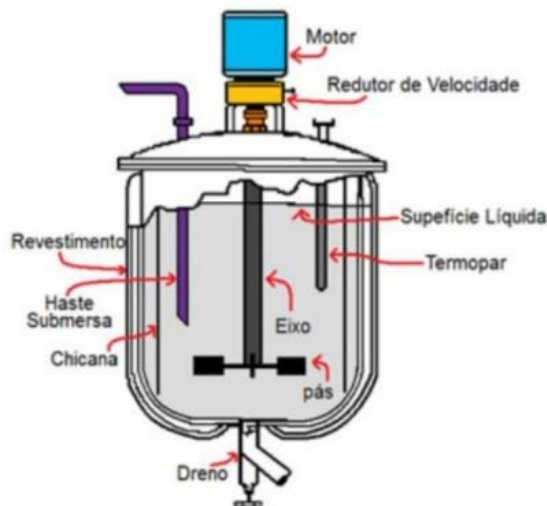
- Operações baseadas em Transferência de Calor (Trocadores de Calor, Aquecimento e resfriamento de fluidos, Evaporação, Condensação, Ebulição, Liofilização);

- Operações baseadas na Transferência simultaneamente de Calor e Massa (Destilação, Cristalização, Secagem e Umidificação de gases, etc.).

2.3.1 Características de um Tanque com Agitação

Os tanques agitados são os equipamentos destinados a promover a agitação e/ou mistura de meios monofásicos (meio líquido), bifásicos (líquido e sólido) ou mesmo trifásicos (meios líquido, sólido e gasoso). Suas proporções variam dependendo da natureza da agitação. Um sistema de agitação, representado na figura 4, é composto por um tanque ou reservatório e por acessórios (MCCABE, 1993).

Figura 4: Esquema de um Sistema de Agitação em um Reator



Fonte: Dias (2018).

- Tanque: reservatório cilíndrico vertical com fundo chato ou arredondado, aberto ou fechado para o ar. Quando este reservatório é pressurizado, além da parte cilíndrica, o reservatório possui tampos e calotas;

- Agitadores (impelidor ou rotor): acessório responsável por transmitir movimento e, conseqüentemente, mistura ao fluido. Os agitadores criam um modelo de fluxo no sistema, fazendo com que o líquido circule através do tanque; podem ser de fluxo axial, que geram

correntes paralelas ao eixo do agitador, de fluxo radial, que geram correntes em direção tangencial ou radial.

- Motor: sistema de acionamento de agitação, geralmente composto por um motor, hidráulico ou elétrico, e um redutor de velocidade, de modo a impor a rotação exigida para a mistura, aumentando o torque;

- Camisas ou serpentinas: acessórios utilizados para manter a temperatura constante na operação;

- Chicanas ou defletores: tem o objetivo de redirecionar o fluxo de mistura, eliminando os possíveis vórtices, são usadas, também, para reduzir o movimento tangencial. Promovem uma maior mistura e provocam a formação de uma superfície líquida livre mais ou menos horizontal.

2.3.2 Configurações E Dimensões Características De Um Tanque Padrão

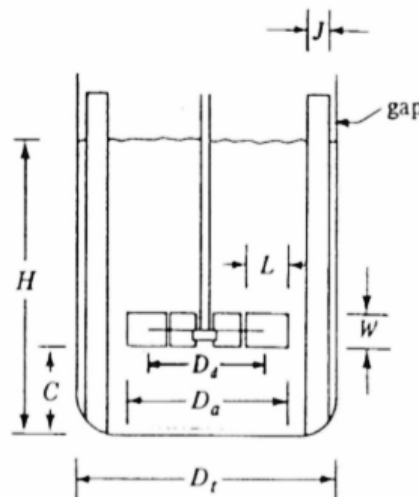
As dimensões típicas de um misturador seguem relações padronizadas já descritas em literaturas de acordo com a Tabela 1 e ilustradas na Figura 5:

Tabela 1: Relações para dimensionamento de um tanque padrão

Gap = 0,10J a 0,15J	$\frac{W}{D_a} = \frac{1}{8}$	$\frac{J}{D_t} = \frac{1}{10} \text{ a } \frac{1}{12}$	$\frac{D_a}{D_r} = 0,3 \text{ a } 0,5$	$\frac{H}{D_t} = 1$
$\frac{C}{D_t} = \frac{1}{3}$	$\frac{W}{D_a} = \frac{1}{5}$	$\frac{D_d}{D_a} = \frac{2}{3}$	$\frac{L}{D_a} = \frac{1}{4}$	$\frac{J}{D_t} = \frac{1}{12}$

Fonte: Dias (2018).

Figura 5: Ilustração das variáveis para dimensionamento de um tanque padrão



Fonte: Dias (2018).

Para exercer ação sobre uma mistura o agitador ou misturador precisa de uma determinada quantidade de energia. É possível calcular a potência necessária consumida em um agitador utilizando a equação:

$$Re = \frac{D_a \cdot N \cdot \rho}{\mu} \quad (22)$$

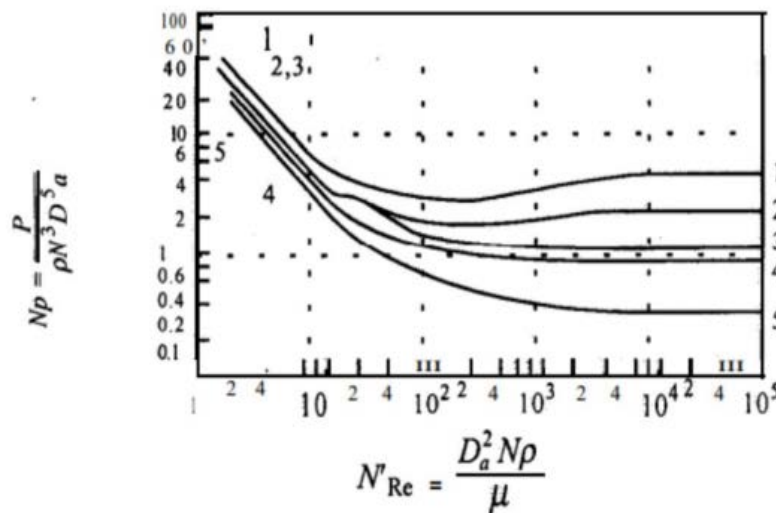
Onde, Re: Número de Reynolds do agitador, D_a é diâmetro do agitador, N é a Velocidade de rotação em rev/s, ρ é a massa específica do fluido em kg/m³ e μ é a viscosidade do fluido em kg/m.s. Também é necessária a seguinte equação:

$$N_p = \frac{P}{\rho \cdot N^3 \cdot D_a^5} \quad (23)$$

Onde, N_p é o Número de potência e P é a Potência em J/s ou W.

Com esses dois números adimensionais, utilizamos o diagrama (Figura 8) para encontrar por exemplo, qual o melhor tipo de agitador, ou ainda, com um tipo de agitação encontrar a potência necessária ou qualquer uma das variáveis relacionadas anteriormente, como diâmetro do agitador.

Figura 6: Gráfico utilizado no projeto de tanques agitados



Fonte: Dias (2018).

As curvas da Figura 8 representam o tipo de agitador e suas características. São elas:

- Curva 1: Turbina de 6 lâminas planas; $D_a/W = 5$; com 4 defletores cada um com $Dt/J = 12$;
- Curva 2: Turbina aberta com 6 lâminas planas; $D_a/W = 8$; com 4 defletores cada um com $Dt/J = 12$;
- Curva 3: Turbina aberta com 6 lâminas a 45''; $D_a/W = 8$; COM 4 defletores cada um

com $Dt/J = 12$;

- Curva 4: Propulsor; inclinação 2Da com 4 defletores com $Dt/J = 10$;
- Curva 5: Propulsor; Inclinação Da, com 4 defletores com $Dt/J = 10$.

2.3.3 Níveis De Agitação

O nível de agitação de um fluido, N_A , é definido pela relação potência/volume de agitação (V_L).

$$N_A = \frac{P}{V_L} \quad (24)$$

Tabela 2. Nível de agitação

$\frac{P}{V_L}$		Nível ou grau de agitação
<u>Watts</u> m^3	<u>HP</u> m^3	
Até 80	até 0.1	Débil
80 - 230	0.1 - 0.3	Suave
230 - 460	0.3 - 0.6	Média
460 - 750	0.6 - 1.0	Forte
750 - 1500	1 – 2	Intensa
1500 - 2250	2 – 3	Muito forte
2250 - 3000	3 - 4	Muito intensa

Fonte: Dias (2018).

2.4 INSTRUMENTAÇÃO E CONTROLE DE PROCESSOS

Dentro do ambiente industrial existem uma infinidade de processos que englobam diversos tipos de variáveis e exigem controle preciso dos produtos gerados. Usualmente, os maiores usuários de instrumentação são as indústrias que atuam nas áreas de petróleo, química, petroquímica, alimentos, cerâmica, siderúrgica, celulose e papel, têxtil, geração de energia elétrica, etc (BEGA, 2011).

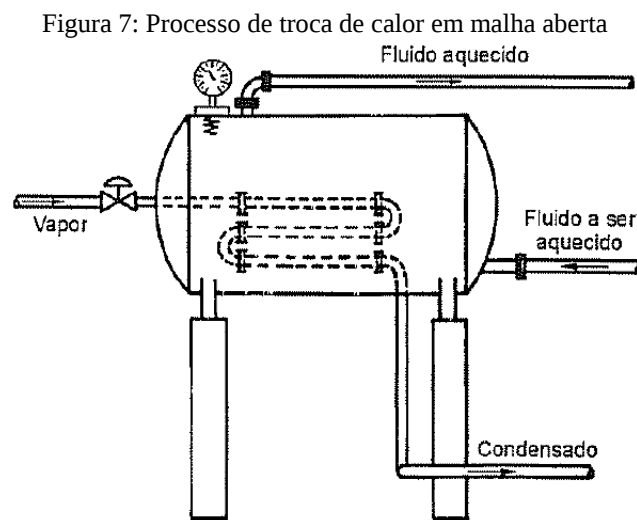
Em todos esses processos é indispensável se controlar e manter constantes as principais

variáveis, tais como pressão, nível, vazão, temperatura, pH, condutividade, velocidade, umidade, etc. Os instrumentos de medição e controle permitem manter e controlar estas variáveis em condições mais adequadas e precisas do que se elas fossem controladas manualmente por um operador (BEGA, 2011).

Os sistemas de controle mantêm a variável controlada no valor especificado, comparando o valor da variável medida, ou a condição a controlar, com o valor desejado ponto de ajuste ou set point), e fazendo as correções em função do desvio existente entre estes dois valores (erro ou offset), sem a necessidade de intervenção do operador (OGATA, 2010).

2.4.1 Sistema em Malha Aberta

Sistema em malha aberta é aquele em que a informação sobre a variável controlada não é utilizada para ajustar qualquer valor da variável de entrada, visando compensar as variações que ocorrem nas variáveis do processo e que influenciam na variável controlada, como está ilustrado na Figura 7. O conceito de malha aberta é frequentemente utilizado nas discussões dos sistemas de controle, para indicar que está se investigando a dinâmica do processo em uma condição não controlada, ou seja, investiga-se apenas a dinâmica do processo (BEGA, 2011).



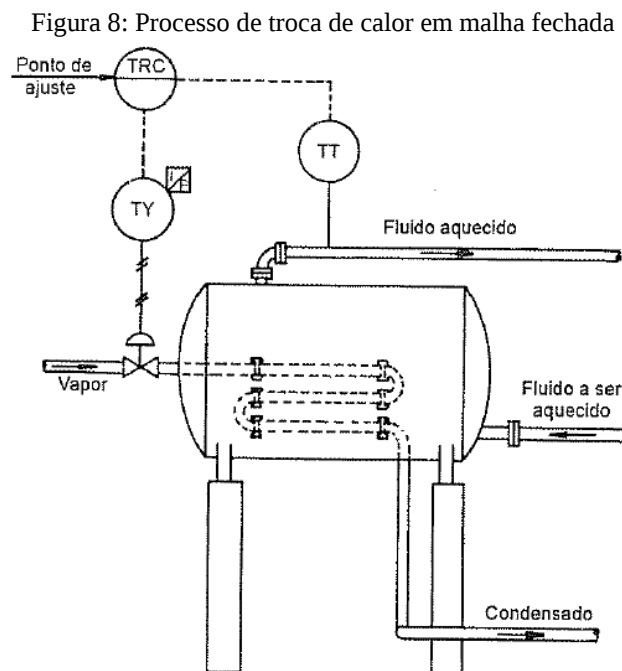
Fonte: Bega (2011).

2.4.2 Sistema em Malha Fechada

Em um sistema em malha fechada, ou sistema de controle com realimentação, a função do controle é manipular a relação entrada/saída de energia ou material, de maneira que a variável controlada do processo seja mantida dentro dos limites estabelecidos, ou seja, o sistema de controle em malha fechada regula a variável controlada, fazendo correções em outra variável

do processo, que é chamada de variável manipulada. O controle em malha fechada pode ser realizado por um operador humano (controle manual) ou mediante a utilização de instrumentação (controle automático). As etapas de controle podem ser divididas em medir, comparar, computar e corrigir (BEGA, 2011).

Na Figura 8, a medição é feita pelo transmissor de temperatura (TT), em seguida há a comparação do valor medido pelo transmissor com o ponto de ajuste dado pelo operador (set point) para obtenção do valor do erro (valor do erro = valor do ponto de ajuste - valor medido da variável controlada) e a computação (que irá considerar os ajustes o tipos de ações de controle utilizadas) são executadas pelo controlador de temperatura (TRC), enquanto a correção será efetivada pela válvula de controle (TV), com base no sinal recebido do TRC (BEGA, 2011).



Fonte: Bega (2011).

A forma de execução e o tempo gasto para efetivação das ações controle dependem, basicamente, do sistema de controle utilizado e das características do processo controlado. Como as características do processo controlado (capacitâncias, resistências, tempo morto, etc.) não podem ser alteradas, o que se faz é especificar o sistema de controle (transmissor, controlador, válvula, etc.) mais adequado às características do processo controlado, como forma de se otimizar o rendimento e facilitar a operação adequada do equipamento (BEGA, 2011).

Além dos sistemas de controle os processos industriais também utilizam os sistemas de segurança. Basicamente, os sistemas de controle atuam enquanto o processo controlado estiver

operando dentro das condições normais para os quais ele foi projetado, porém quando o processo controlado sair das condições normais de operação e se aproximar ou adentrar nas condições de operação consideradas anormais e que possam ocasionar dificuldades/riscos operacionais (ao equipamento ou ao processo), pessoais ou ambientais, os sistemas de segurança atuam para parar o processo ou evitar que danos maiores ocorram (BEGA, 2011).

2.4.3 Características Gerais De Instrumentos

Nas instalações industriais é comum se encontrar arranjos complexos de instrumentos de medição e controle. Os instrumentos podem ser classificados em (BEGA, 2011):

- INSTRUMENTOS CEGOS

São instrumentos que não possuem indicação visível do valor da variável medida. Os instrumentos de alarme, tais como pressostatos e termostatos, que só possuem uma escala exterior com um índice de seleção para ajuste do ponto de atuação. Os transmissores de vazão, pressão, nível e temperatura sem indicação local também são instrumentos cegos.

- INSTRUMENTOS INDICADORES

São instrumentos que dispõem de indicador e escala graduada, na qual se pode ler o valor da variável medida/controlada.

- INSTRUMENTOS REGISTRADORES

São instrumentos que registram a variável medida/controlada com um traço contínuo ou através de pontos.

- ELEMENTOS PRIMÁRIOS

São elementos que estão em contato direto com a variável medida/controlada e que utilizam ou absorvem energia do próprio meio, para fornecer ao sistema de medição uma resposta em função da variação da variável medida/controlada.

- TRANSMISSORES

São instrumentos que detectam as variações na variável medida/controlada através do respectivo elemento primário e transmitem-na a distância. O elemento primário pode ou não fazer parte integrante do transmissor.

- CONVERSORES

São instrumentos que recebem um sinal de entrada padrão, pneumático ou eletrônico, procedente de um outro instrumento, e convertem-no em um sinal de saída também padrão, que pode ser de dois tipos, 4 a 20 mA ou 0,2 a 1,0 kgf/cm² (19,614 a 98,07 kPa).

- CONTROLADORES

São instrumentos que comparam o valor da variável medida/controlada com valor desejado (set point ou ponto de ajuste) e exercem uma ação de correção variável manipulada, função da diferença entre estes dois valores (erro ou offset) de sua equação de controle (controladores P, P+I, P+I+D).

- **ELEMENTOS FINAIS DE CONTROLE**

São equipamentos que recebem o sinal de correção do controlador e, em função deste sinal, modificam/atua sobre a variável manipulada ou agente de controle (válvula de controle).

A área de instrumentação e controle de processos utiliza terminologia própria. Os termos utilizados, além de definirem as características dos sistemas de medição e controle, também definem as características estáticas e dinâmicas dos diversos instrumentos utilizados.

- **FAIXA DE MEDIDA (RANGE)**

Faixa ou conjunto de valores da variável medida controlada que estão compreendidos dentro dos limites superior e inferior de capacidade de medição, transmissão ou controle do instrumento, vem expressa estabelecendo os seus valores extremos.

- **ALCANCE (SPAN)**

É a diferença algébrica entre os valores superior e inferior da faixa de medida (range) do instrumento.

- **ERRO (OFFSET)**

No caso de controladores, erro (offset) é a diferença entre o valor do ponto de ajuste (set point) e o valor medido da variável controlada. O erro médio do instrumento é a média aritmética dos erros em cada ponto de medida, determinados para todos os valores crescentes e decrescentes da variável.

- **PONTO DE AJUSTE (SET POINT)**

É o ponto no qual o controlador é ajustado para controlar o processo.

- **PRECISÃO (ACCURACY)**

É a tolerância de medição ou de transmissão do instrumento. Define o limite dos erros cometidos quando o instrumento é utilizado em condições normais de serviço.

- **SENSIBILIDADE (SENSITIVITY)**

Valor mínimo que a variável deve mudar para obter-se uma variação na indicação ou transmissão. Normalmente expressa em porcentagem do alcance (span).

- **REPETIBILIDADE (REPETIBILITY)**

É a capacidade de reprodução da indicação ou transmissão ao se medir, repetidamente,

valores idênticos da variável medida, nas mesmas condições de operação e no mesmo sentido de variação. A repetibilidade é geralmente expressa em porcentagem do alcance (span).

- **HISTERESE (HYSTERESIS)**

Diferença máxima que se observa nos valores indicados pelo instrumento, para um mesmo valor qualquer da faixa de medida, quando a variável percorre toda a escala tanto no sentido crescente como no decrescente.

- **ELEVAÇÃO DE ZERO**

É a quantidade com que o valor zero da variável supera o valor inferior da faixa de medida (range). Pode ser expresso em unidades da variável medida ou porcentagem do alcance (span).

- **SUPRESSÃO DE ZERO**

É a quantidade com que o valor inferior de faixa medida (range) supera o valor zero da variável. Pode ser expresso em unidades da variável medida ou porcentagem do alcance (span).

2.4.4 Controle PID

Dispositivos de realimentação mecânicos têm sido utilizados desde o final do século 18 na forma de governadores. Estes eram limitados a apenas um ou dois elementos de Proporcional, Integral ou Derivativo e foram originalmente planejados para manter uma velocidade de operação consistente em motores a vapor que estavam sendo usados para acionar máquinas de fábrica (SMITH, 2012).

O primeiro controlador PID completo foi desenvolvido em 1911 por Elmer Sperry para a Marinha dos EUA para automatizar a direção de navios. Sperry projetou seu sistema para imitar o comportamento dos timoneiros, que eram capazes de compensar uma variância persistente, bem como antecipar como a variação iria mudar no futuro.

Posteriormente, em 1922, o engenheiro Nicolas Minorsky publicou a primeira análise teórica do controle de IDP, baseada em observações da capacidade de um timoneiro de se adaptar às mudanças. Minorsky tornou essa capacidade do timoneiro como uma fórmula matemática, que formou a base para o controle moderno do PID.

Apesar de ser uma tecnologia antiga, cerca de 70% dos controladores industriais em uso atualmente emprega esquemas de controle PID ou PID modificado, apesar de já existirem técnicas de controle mais avançadas como Controle por Lógica Nebulosa (fuzzy logic), Controle Adaptativo, Controle Inferencial e o Controle Preditivo Com Otimização (Mpc) (SMITH, 2012).

A utilidade dos controles PID está na sua aplicabilidade geral à maioria dos sistemas de controle. Em particular, quando o modelo matemático da planta não é conhecido e, portanto, métodos de projeto analítico não podem ser utilizados, controles PID se mostram os mais úteis (SMITH, 2012).

2.4.5 Regras de sintonia de Ziegler-Nichols para controladores PID

O processo de selecionar parâmetros do controlador que garantam dada especificação de desempenho é conhecido como sintonia do controlador. Ziegler e Nichols sugeriram regras para a sintonia de controladores PID (ajuste dos valores de K_p , T_i e T_d) baseadas na resposta experimental ao degrau ou no valor de K_p que resulta em uma estabilidade marginal, quando somente uma ação proporcional é utilizada. As regras de Ziegler-Nichols, são úteis quando os modelos matemáticos da planta são desconhecidos. Elas sugerem um conjunto de valores de K_p , T_i e T_d que vão proporcionar uma operação estável do sistema. As regras de sintonia de Ziegler-Nichols fornecem estimativas dos valores dos parâmetros e proporcionam um ponto de partida na sintonia fina, e não os valores definitivos de K_p , T_i e T_d logo na primeira tentativa (OGATA, 2010).

Existem dois métodos denominados regras de sintonia de Ziegler-Nichols: o primeiro e o segundo método.

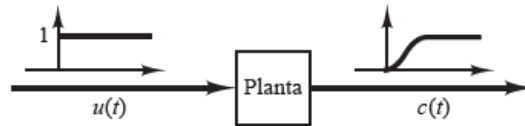
2.4.5.1 Primeiro método de sintonia de Ziegler-Nichols

Obtém-se experimentalmente a resposta da planta a uma entrada em degrau unitário, como mostra a Figura 9. Se a planta não possui integradores ou polos complexos conjugados dominantes, então essa curva de resposta ao degrau unitário pode ter o aspecto de um S, como se pode ver na Figura 10. Esse método se aplica se a curva de resposta ao degrau de entrada tiver o aspecto de um S. Essa curva de resposta ao degrau pode ser gerada experimentalmente ou a partir de uma simulação dinâmica da planta (OGATA, 2010).

A curva com o formato em S pode ser caracterizada por duas constantes, o atraso L e a constante de tempo T . O atraso e a constante de tempo são determinados desenhando-se uma linha tangente no ponto de inflexão da curva com o formato em S e determinando-se a intersecção da linha tangente com o eixo dos tempos e a linha $c(t) = K$, como mostra a Figura 12. A função de transferência $C(s)/U(s)$ pode ser aproximada por um sistema de primeira ordem com um atraso de transporte, como segue:

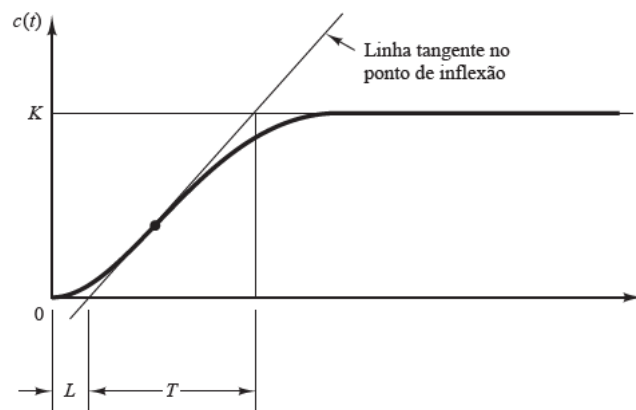
Figura 9: Resposta ao degrau unitário de uma planta.

$$\frac{C(s)}{U(s)} = \frac{Ke^{-Ls}}{Ts + 1} \quad (25)$$



Fonte: Ogata (2010).

Figura 10: Curva de resposta em forma de S.



Fonte: Ogata (2010).

Ziegler e Nichols sugeriram escolher os valores de K_p , T_i e T_d , de acordo com a fórmula que aparece na Tabela 3.

Tabela 3: Regra de sintonia de Ziegler-Nichols baseada na resposta ao degrau da planta (primeiro método).

Tipo de controlador	K_p	T_i	T_d
P	$\frac{T}{L}$	∞	0
PI	$0,9 \frac{T}{L}$	$\frac{L}{0,3}$	0
PID	$1,2 \frac{T}{L}$	$2L$	$0,5L$

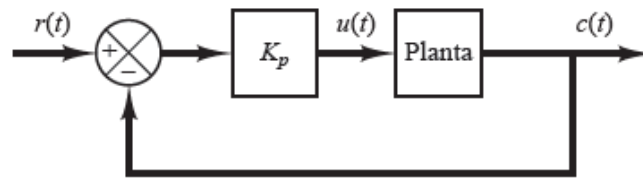
Fonte: Ogata (2010).

2.4.5.2 Segundo método de sintonia de Ziegler-Nichols

No segundo método, definimos primeiro $T_i = \infty$ e $T_d = 0$. Usando somente a ação de controle proporcional, Figura 11, aumenta-se K_p de 0 ao valor crítico K_{cr} , no qual a saída exibe

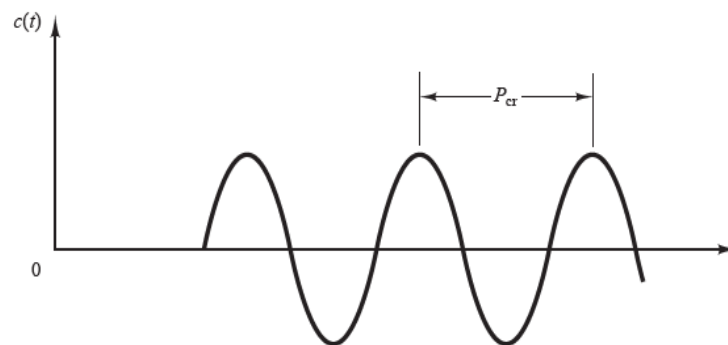
uma oscilação sustentada pela primeira vez. (Se a saída não exibe uma oscilação sustentada para qualquer valor que K_p pode assumir, então esse método não se aplica.) Portanto, o ganho crítico K_{cr} e o período P_{cr} correspondente são determinados experimentalmente, Figura 12. Ziegler e Nichols sugeriram escolher os valores dos parâmetros K_p , T_i e T_d de acordo com a fórmula mostrada na Tabela 7.

Figura 11: Sistema de malha fechada com um controlador proporcional



Fonte: Ogata (2010).

Figura 12: Oscilação sustentada com período P_{cr} . (P_{cr} é medido em segundos.)



Fonte: Ogata (2010).

Tabela 4: Regra de sintonia de Ziegler-Nichols baseada no ganho crítico K_{cr} e no período crítico P_{cr} (segundo método).

Tipo de controlador	K_p	T_i	T_d
P	$0,5K_{cr}$	∞	0
PI	$0,45K_{cr}$	$\frac{1}{1,2}P_{cr}$	0
PID	$0,6K_{cr}$	$0,5P_{cr}$	$0,125P_{cr}$

Fonte: Ogata (2010).

2.5 INTERNET DAS COISAS

O movimento de transformação da manufatura pelas novas tecnologias digitais visa obter máquinas e sistemas que troquem informações de forma clara e efetiva. Dessa forma, elas seriam capazes de possuir inteligência suficiente a fim de atingir a autonomia nas unidades fabris e controle da produção (QIN; LIU; GROSVENOR, 2016). A palavra chave para o

movimento é conexão. O cerne da revolução consiste no ciclo da informação que vai do físico para digital, e então retorna na forma de uma ação física (DELOITTE, 2017).

Essa conexão entre o ambiente físico e o digital é comumente chamado de sistema ciber-físico (CPS) (BAHETI; GILL, 2011). Promover a conectividade entre as técnicas de operação com o fornecimento de informação em tempo real é uma das características dessa quarta onda de transformação. (DELOITTE, 2017).

É possível resumir a Internet de Tudo no ambiente industrial (*Internet of Everything*) através de um cenário em que equipamentos, pessoas, processos e dados se comunicam por meio de conexões sem fio (SILVA, 2016). A forma como as tecnologias se comunicam e se conectam entre si para tornar métodos e processos cada vez mais inteligentes pode ser considerado um dos objetivos dessa evolução (DE LEEUW, 2017).

Uma comunicação clara e efetiva, juntamente com o entendimento e controle das informações geradas são considerados por Qin, Liu e Grosvenor (2016) como os principais conceitos de desenvolvimento da Indústria 4.0, sendo ainda estratificado em subcategorias como digitalização, flexibilização, auto otimização, manutenção preditiva, etc

A integração dos dados e da informação, além de diminuir o tempo desperdiçado em processos individualizados, também agrega valor ao planejamento estratégico e influencia a forma como os líderes tomam decisões, visto que a informação passa a ser transmitida em tempo real. Analistas sugerem que é possível atingir um aumento de até 40% na produtividade dos funcionários, quando o acesso a informação é mais amplo e difundido (CHEMICAL INDUSTRY JOURNAL, 2015).

Uma planta com a aplicação de tecnologias inteligentes a nível fabril capaz de obter completa integração no planejamento e programação de produção, alcança além de aumento de produtividade, economia de recursos e melhor performance competitiva (QIN; LIU; GROSVENOR, 2016). São diminuídos, também, os riscos de acidentes, uma vez que a presença de sistemas de prevenção de falha torna a detecção de erros e respostas em tempo real possíveis (YUAN; QIN; ZHAO, 2017).

A conectividade e a integração entre objetos e sistemas, juntamente com a ampla utilização de tecnologias sem fio como *wi-fi*, *bluetooth* e radiofrequência, permitiram o desenvolvimento do conceito de Internet das Coisas (*Internet of Things – IoT*). Um exemplo disso é que, no ano de 2011, o número de dispositivos interconectados ultrapassou o número de pessoas no mundo (GUBBI et al., 2013).

Uma das definições para Internet das Coisas passa pelo conceito de Panorama Operacional Comum (*Common Operating Picture – COP*), em que utensílios do cotidiano se

comunicam através do envio de dados a uma plataforma computacional. Dessa forma, esses dados podem servir como peças de um quebra-cabeça que se encaixam para que se tenha uma visão mais ampla dos processos e, assim, seja possível solucionar problemas de forma mais assertiva (GIUSTO et al., 2010, p.V).

Esse enorme número de dados gerados por equipamentos inteligentes que se associam ao IoT precisa de uma infraestrutura que permita a integração e o monitoramento das informações. Isso é possível quando se entende a Internet das Coisas, a Computação em Nuvem, Big Data e análise de dados como etapas de um processo maior de geração e processamento de informações (GUBBI et al., 2013).

O objetivo é que essa integração entre aparelhos seja inconsciente, invisível e onipresente. Para isso, é necessário obedecer a três conceitos: o primeiro é o conhecimento compartilhado do usuário e das aplicações em que a tecnologia está sendo utilizada; o segundo é a arquitetura dos *softwares* e comunicação entre as redes a fim de encaminhar a informação para onde é relevante e, por fim, a utilização de ferramentas analíticas junto aos objetos inteligentes que buscam um comportamento autônomo (GUBBI et al., 2013).

2.5.1 Microcontrolador Esp32

ESP32 é uma série de microcontroladores poderosos, baratos e com baixo consumo de energia que possuem Wi-Fi integrado e Bluetooth. A série ESP32 (Figura 13) consiste em um microprocessador dual-core Tensilica Xtensa LX6 de 32 bits funcionando a 240 MHz e inclui interruptores de antena integrados, balun de RF, amplificador de potência, amplificador de recepção de baixo ruído, filtros e gerenciamento de energia módulos. ESP32 é desenvolvido por uma empresa de semicondutores Espressif Systems na China, e é fabricado pela TSMC (Taiwan Semiconductor Manufacturing Company). É um sucessor do módulo de microcontrolador ESP8266 anterior (ESPRESSIF, 2021).

3.1 REATOR QUÍMICO

Os reatores industriais são projetados para operar da forma mais próxima possível dos ideais. Quanto mais distante de um reator ideal, menor é a conversão obtida, o que não é interessante para a indústria. Por isso, todas as relações para dimensionamento de um tanque padrão descritas na fundamentação teórica foram atendidas. Para fabricação do reator foram utilizados um tanque em aço inox 304 (Figura 15) com diâmetro de 233 mm e altura de 360 mm, possuindo um volume máximo de 10 L.

Figura 15: Tanque utilizado para fabricação do Reator



Fonte: Dados da pesquisa (2021).

Na parte interna foram soldadas 4 chicanas para evitar formação de vórtices, além da instalação das conexões hidráulicas para entrada e saída dos fluidos.

3.2 AGITADOR

Para o desenvolvimento do agitador foi utilizado um motor DC, uma caixa de redução 4:1, um acoplamento rígido de alumínio e um eixo de aço inox com impelidor de pás inclinadas de aço inox 304.

3.2.1 Motor

O motor DC AK555/390ML12S18200C (Figura 16) possui rotação aproximada de 18200 RPM. Outras características são Diâmetro do eixo: 3,175mm (1/8"), Tensão: 12 Vdc, Corrente (sem carga): 1,35 A, Corrente (máximo rendimento): 6,8 A, Potência (máximo rendimento): 64 W e Torque: 390 gf.cm.

Figura 16: Motor utilizado no sistema de agitação



Fonte: Dados da pesquisa (2021).

3.2.2 Caixa De Redução

A caixa de redução (Figura 17) é necessária para diminuir a rotação e aumentar o torque do motor. A caixa de redução utilizada foi a Orbit500 4:1, que reduziu a rotação do motor para 4550 RPM e aumentou o torque para 1,6 kgf.cm.

Figura 17: Acoplamento montado no motor



Fonte: Dados da pesquisa (2021).

3.2.3 Acoplamento Rígido

Os acoplamentos são elementos de transmissão mecânica que unem eixos de dois maquinários diferentes. A função básica do acoplamento rígido é unir dois sistemas de uma forma que eles pareçam um só. A partir do acoplamento, é possível ter a transmissão de torque e rotação do acionamento à aplicação.

O acoplamento rígido (Figura 18) possui uma estrutura mais firme, sem flexibilidade, garantindo o sincronismo entre os eixos e, em certos tipos, suporta cargas radiais altíssimas. O acoplador utilizado possui diâmetro de 21 mm e 25 mm de altura, seu material é de liga de alumínio.

Figura 18: Imagem do Acoplador Rígido utilizado



Fonte: Dados da pesquisa (2021).

3.2.4 Impelidor De Pás Inclínadas

O impelidor escolhido para a agitação da mistura foi o de pás inclinadas com 4 pás inclinadas à 45° (Figura 19), pois permite um melhor escoamento axial, obtendo bons resultados no processo de agitação e mistura de diferentes tipos de produtos, podendo ser misturas de líquido e pó, líquido – líquido, entre outros.

Figura 19: Imagem do Impelidor de pás inclinadas utilizado



Fonte: Dados da pesquisa (2021).

3.3 SENSORES

Os Sensores são dispositivos com a conseguem de transformar variáveis físicas — como temperatura ou pressão, por exemplo — em informações que possam ser lidas e compreendidas por um sistema. Sendo assim, cada tipo de sensor é capaz de detectar determinada grandeza física. Em seguida, ele transforma essa grandeza em sinais elétricos, sonoros ou em dados.

Os sensores utilizados no presente trabalho foram: 3 sensores de temperatura do tipo

sonda DS18B20, 2 sensores de temperatura do tipo NTC 100K 3950, 1 sensor de pressão modelo USP-G41, 1 sensor de pH modelo PH-4502C, 1 sensor de corrente modelo ACS712, 1 sensor de nível ultrassônico modelo RS485 e 2 sensores de fluxo modelo YF-S201.

3.3.1 Sensor de Temperatura DS18B20

O Sensor de Temperatura DS18B20 (Figura 20) é um componente eletrônico digital desenvolvido para ser aplicado nos mais diversos ambientes, pois é capaz de medir a temperatura em locais úmidos, inclusive estando submerso. Além de apresentar ampla resistência a umidade, apresenta como diferencial a presença de um encapsulamento em aço inox, podendo ser instalado em tubulações com fluidos quentes ou frios. Um diferencial do sensor DS18B20 é a sua capacidade de possibilitar leituras com resolução entre 9 a 12-bit, a qual é configurável. Além de possuir uma interface de comunicação simples por meio de um fio único, função conhecida como 1-Wire. Outras características são Tensão de alimentação: 3.0 - 5.5VDC; Leitura de temperatura entre: -55°C a $+125^{\circ}\text{C}$; Fios: Tempo de atualização: $<750\text{ms}$; Precisão: $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$.

Figura 20: Sensor de Temperatura DS18B20



Fonte: Dados da pesquisa (2021).

3.3.2 Sensor De Temperatura NTC 100K 3950

O Sensor de Temperatura NTC 100K 3950 (Figura 22) é um sensor desenvolvido especialmente para aplicações que possuam pouco espaço, atuando de forma rápida e eficiente. O diferencial desse modelo está em sua ampla faixa de trabalho de -40°C a 300°C . O Termistor NTC 3950 possui resistência de 100k ohms, possuindo cabos isolados e com grande resistência, além de apresentar a ponta protegida com vidro, possibilitando maior resistência ao calor.

Figura 21: Sensor de temperatura NTC 100K 3950



Fonte: Dados da pesquisa (2021).

3.3.3 Sensor De Pressão Modelo USP-G41

O Sensor de Pressão USP-G41 (Figura 22) é capaz de detectar pressão de gases não corrosivos, água, óleo, e outros líquidos não corrosivos. Como diferencial esse modelo é capaz de ser facilmente integrado com microcontroladores, possuindo apenas 3 fios para conexão. O Sensor trabalha com escalas de pressão entre 0 a 1,2 MPa e sua temperatura de trabalho deve estar entre 0 a 85. A estrutura do sensor é totalmente metálica, produzida a partir de uma liga de aço carbono.

Figura 22: Sensor de pressão modelo USP-G41



Fonte: Dados da pesquisa (2021).

3.3.4 Sensor De Ph Modelo PH-4502C

O Sensor de pH (Figura 23) é indicado para verificar e manter os níveis de pH dentro de escalas seguras. O conjunto é formado por um Eletrodo PH e um módulo eletrônico que faz a intermediação com o microcontrolador, podendo o eletrodo ficar submerso somente com o cabo externo exposto. Outras características são tensão de aquecimento: $5 \pm 0.2V$ (AC/DC); Corrente de trabalho: 5-10mA; Faixa de temperatura: 0 a 60°C; Tempo de resposta: 5S; Tempo

de sedimentação: 60S; Componente Potência: 0,5 W; Saída: Analógica; Faixa de medição: 0,00 a 14,00; Erro: 0.2pH; Resistência interna: <250MOhm.

Figura 23: Sensor de pH modelo PH-4502C



Fonte: Dados da pesquisa (2021).

3.3.5 Sensor De Nível Ultrassônico RS485

O Sensor Ultrassônico RS485 (Figura 24) foi desenvolvido para calcular a distância com precisão de objetos entre 2cm à 400 centímetros. O principal diferencial deste sensor é sua ampla e eficiente resistência à umidade, sendo principalmente utilizado em ambientes úmidos, permitindo manter distância do microcontrolador.

O sensor é composto por um emissor e um receptor, com capacidade de medir distâncias em uma faixa de 2cm até 400cm, com uma precisão de aproximadamente 3mm. Este sensor emite sinais ultrassônicos que refletem no objeto a ser atingido e retornam ao sensor, precisando a distância do alvo, tomando o tempo de trânsito do sinal do ultrassom. A velocidade do sinal ultrassônico emitida pelo sensor corresponde a velocidade do som, que é de aproximadamente 340 m/s, assim, a onda é enviada pelo sensor e rebatida no obstáculo, logo ela percorre 2 vezes a distância procurada.

Figura 24: Sensor de nível ultrassônico RS485



Fonte: Dados da pesquisa (2021).

3.3.6 Sensor De Fluxo Modelo YF-S201

O Sensor de Fluxo de Água YF-S201 (Figura 27) ao ser conectado a uma linha de fluxo, mede a quantidade de líquido que passa por ele através de um sensor de efeito hall integrado, cada giro gera um pulso elétrico. Consegue medir vazão entre 1 a 30 litros por minuto, enviando pulsos ao microcontrolador com as informações captadas. Outras características Tensão de trabalho: DC 4.5V; Corrente máxima de trabalho: 15mA; Vazão de água: 1 a 30L/min; Temperatura de operação: $\leq 80^{\circ}\text{C}$; Pressão máxima: $\leq 1.75\text{Mpa}$.

Figura 25: Sensor de fluxo YF-S201



Fonte: Dados da pesquisa (2021).

3.3.7 Sensor De Corrente ACS712

O Sensor de Corrente ACS712 20A (Figura 26) é um componente eletrônico desenvolvido para medição da corrente que está sendo consumida por um determinado componente eletrônico e consequentemente calcular seu consumo de energia elétrica. Além de diagnosticar se determinado circuito está consumindo mais energia do que deveria. Uma

característica a ser destacada é sua capacidade de medir correntes AC (alternadas) e correntes DC (contínuas) de até 20A. Outras características são Tensão de alimentação: 5V; Corrente máxima: 20A; Tempo de resposta: 5uS; Largura de banda: 80Khz; Margem de erro: 1.5% a 25°C; Resistência interna: 0.0012 ohm e Tensão de isolamento: 2.1KVRMS.

Figura 26: Sensor de corrente ACS712



Fonte: Dados da pesquisa (2021).

3.4 VÁLVULAS

As válvulas de controle desempenham um papel muito importante no controle automático de processos industriais. Tais processos dependem de algum tipo de elemento final de controle para executar tarefas de transferência de fluidos, controle de transferência de calor e redução de pressão. Os elementos finais de controle que tem na válvula seu principal representante e são os responsáveis pela manipulação do fluxo de matéria e/ou energia, que tem como finalidade atuar no processo de modo a corrigir o valor da variável controlada sempre que houver algum desvio em relação ao valor desejado.

No presente trabalho, foram utilizadas 1 válvula motorizada do tipo esfera, 1 válvula do tipo Solenóide 1/4" e 2 válvulas do tipo Solenóide 3/4".

3.4.1 Válvula Motorizada Esfera

A Válvula Motorizada Esfera (Figura 27) apresenta de um motor robusto que permite que a esfera interna no cano seja aberta ou fechada de forma gradativa, possibilitando o controle da vazão de forma adequada para cada tipo de aplicação. O funcionamento acontece quando a válvula for alimentada com tensão de 12VDC, ela inicia a abertura ou fechamento, levando cerca de 4 segundos para chegar ao estágio completo, de forma que o tempo que ficar energizada definirá o estágio de abertura. Para que faça o caminho inverso, é necessário inverter os pinos

de energia. Sempre que o for privada da energia, se manterá no estágio de parada. A válvula apresenta corpo aço inox 304, possibilitando maior resistência e permitindo o controle de fluidos quentes ou frios.

Figura 27: Válvula Motorizada Esfera



Fonte: Dados da pesquisa (2021).

3.4.2 Válvula Solenóide 1/4"

Este modelo de válvula solenóide normalmente fechada faz o controle On/Off da passagem de gases, quando a bobina é energizada o êmbolo permite a passagem e quando não está energizada, ele fecha a passagem (Figura 28).

Figura 28: Válvula Solenóide 1/4"



Fonte: Dados da pesquisa (2021).

3.4.3 Válvula Solenóide 3/4"

A Válvula Solenoide para Água 3/4" (Figura 29) possui internamente uma bobina em formato de cilíndrico. No momento que uma determinada corrente elétrica é conduzida pela bobina, ela gera uma força no seu centro, a qual é responsável pelo acionamento do êmbolo que se encontra na parte interna e é responsável pela abertura e fechamento do sistema.

Figura 29: Válvula Solenóide 3/4"



Fonte: Dados da pesquisa (2021).

3.5 PLATAFORMA DE IOT

Uma Interface homem-máquina (HMI) consiste em um painel que permite a um usuário se comunicar com uma máquina, um programa de computador ou um sistema. Tecnicamente, HMI pode ser qualquer tela que alguém use para interagir com um dispositivo, mas em geral ele é usado para descrever as telas utilizadas em ambientes industriais. As HMIs exibem dados em tempo real e permitem que um usuário controle o equipamento usando uma interface gráfica do usuário.

Existem diversas formas de construir uma HMI, pode ser desenvolvida através de software externo para ser executada em um computador, pode ser desenvolvida diretamente em um software específico ou pode-se usar plataformas online em que o microcontrolador envia e recebe dados por wifi. No presente trabalho a tecnologia escolhida para desenvolver uma HMI para o reator foi a utilização da Plataforma Arduino IOT Cloud.

4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Os testes de validação do sistema visaram a confirmação da eficiência do reator desenvolvido, buscando identificar possíveis pontos de melhorias e detalhamentos operacionais, auxiliando na definição de falhas não previstas na concepção do sistema.

Assim, foram realizados testes utilizando água para verificar os sensores e o controle do reator.

O primeiro passo foi indicar o valor do volume de teste na interface. Em seguida, a bomba foi acionada para encher o tanque com água até o valor indicado na interface. Quando o sensor de vazão indicou que o volume foi alcançado, o controlador acionou a válvula solenoide que interrompeu a entrada de água e em seguida a bomba foi desligada.

Posteriormente, o valor de setpoint da temperatura foi selecionado na interface em 40°C e a agitação foi iniciada. Os sensores de temperatura forneceram uma média do valor da temperatura em tempo real para o controlador, que através da técnica de controle PID ajustou a potência do elemento de aquecimento para que a temperatura se mantivesse dentro de uma margem de erro de $\pm 2^\circ\text{C}$.

Após os 5 minutos de agitação, percebeu-se uma ligeira diferença de 0,4°C entre os valores da temperatura dos 3 sensores de temperatura que estão em alturas diferentes do reator. Isso ocorre devido a existência de um gradiente axial de temperatura dentro do reator.

Por fim, a agitação e o elemento de aquecimento foram desligados e a válvula esfera automatizada foi acionada para permitir o esvaziamento do reator.

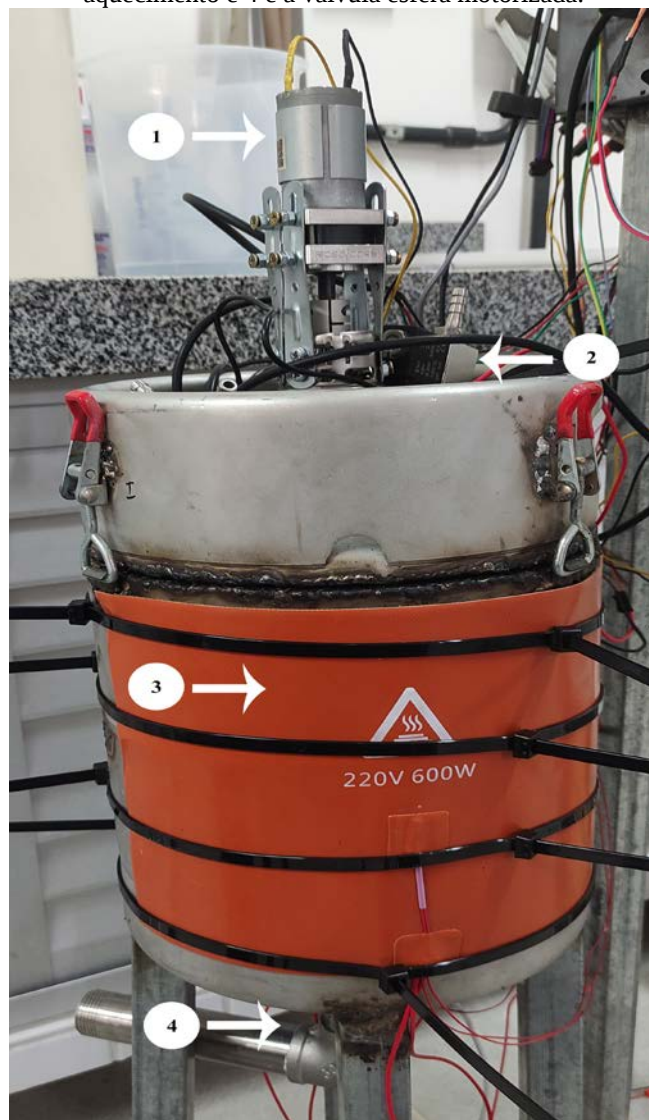
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo apresenta a discussão e contextualização da montagem do reator e, em seguida, expõe os resultados do teste de validação encontrados durante a realização do experimento.

5.1 MONTAGEM DO REATOR

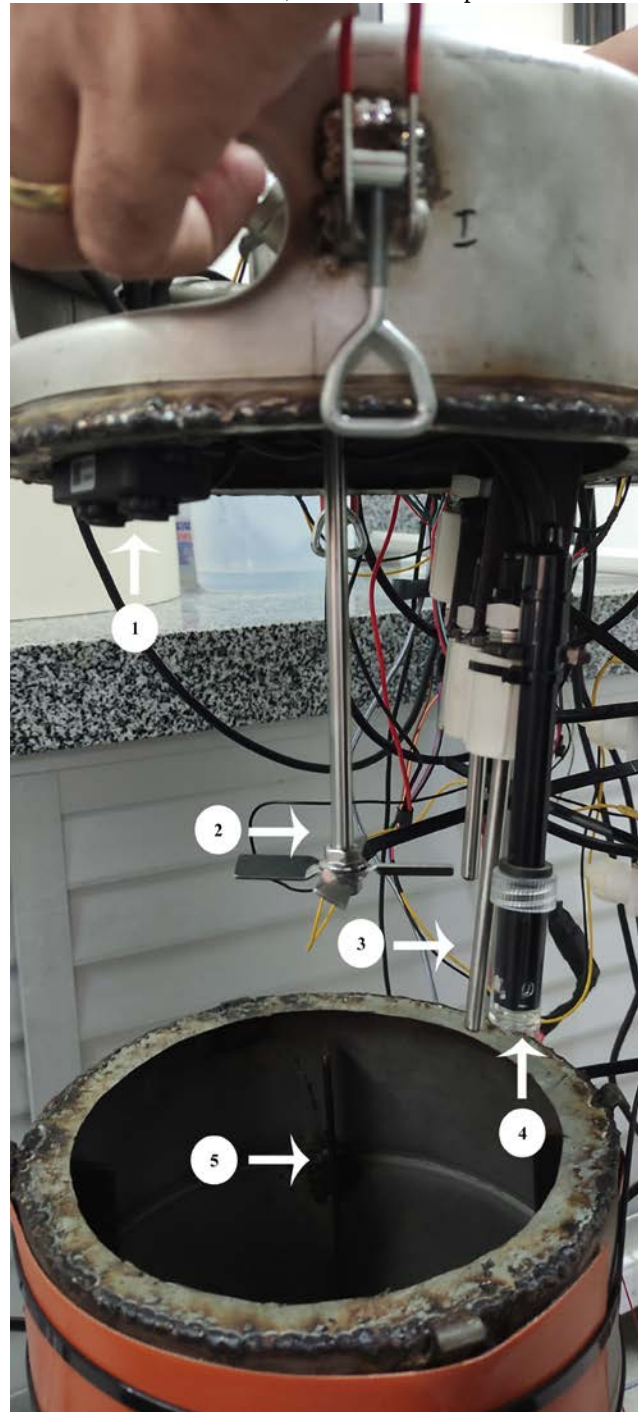
A montagem do reator se deu inicialmente abrindo o tanque e instalando os 4 defletores, as conexões hidráulicas, os sensores, o agitador, as válvulas e o elemento de aquecimento, como pode ser visto na figura 30 e na figura 31.

Figura 30: Montagem do reator, onde 1 é o motor do agitador, 2 é a válvula de alívio de pressão, 3 é a manta de aquecimento e 4 é a válvula esfera motorizada.



Fonte: Dados da pesquisa (2021).

Figura 31: Parte interna do reator, onde 1 é o sensor de nível, 2 é o impelidor do agitador, 3 são os sensores de temperatura em alturas diferentes, 4 é o sensor de pH e 5 são os defletores.



Fonte: Dados da pesquisa (2021).

5.2 TESTE DE VALIDAÇÃO

Após a montagem foi realizado um teste de validação com água, o teste foi executado e os resultados mostraram que o sistema de agitação executou uma homogeneização satisfatória. O sistema de controle também apresentou um bom desempenho, pois conseguiu mostrar os desvios em relação ao setpoint, controlando assim a variável desejada (temperatura).

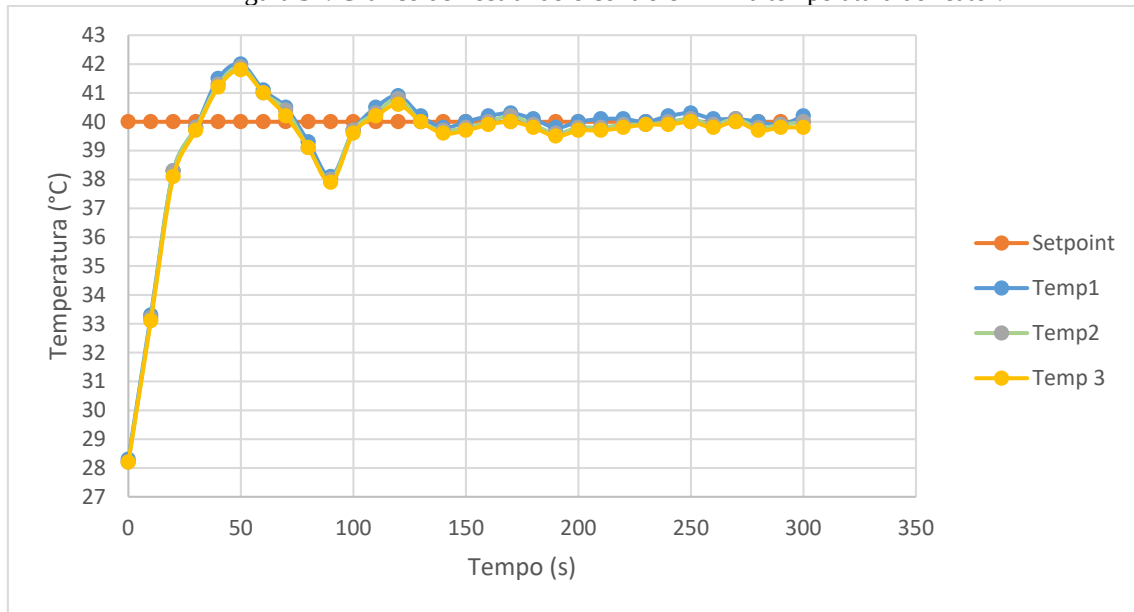
Os resultados obtidos para o controle de temperatura PID com o setpoint em 40°C estão representados na Tabela 5 e na Figura 32:

Tabela 5: Variação da temperatura dos 3 sensores dispostos no reator

t (seg)	Temp 1 (°C)	Temp 2 (°C)	Temp 3 (°C)
0	28,3	28,2	28,2
10	33,3	33,2	33,1
20	38,3	38,3	38,1
30	39,8	39,8	39,7
40	41,5	41,3	41,2
50	42	41,9	41,8
60	41,1	41	41
70	40,5	40,4	40,2
80	39,3	39,1	39,1
90	38,1	38	37,9
100	39,7	39,7	39,6
110	40,5	40,3	40,2
120	40,9	40,8	40,6
130	40,2	40	40
140	39,8	39,7	39,6
150	40	39,8	39,7
160	40,2	40	39,9
170	40,3	40,2	40
180	40,1	39,9	39,8
190	39,8	39,6	39,5
200	40	39,8	39,7
210	40,1	39,8	39,7
220	40,1	39,9	39,8
230	40	39,9	39,9
240	40,2	40	39,9
250	40,3	40,1	40
260	40,1	39,9	39,8
270	40,1	40,1	40
280	40	39,8	39,7
290	39,9	39,9	39,8
300	40,2	40	39,8

Fonte: Dados da pesquisa (2021).

Figura 32: Gráfico demonstrando o controle PID na temperatura do reator.



Fonte: Dados da pesquisa (2021).

6 CONCLUSÃO

O desenvolvimento de um reator em escala de laboratório requer um amplo conhecimento de diferentes áreas da Engenharia Química, segmentos esses que foram abordados no presente trabalho. Como também envolve conhecimentos de eletrônica e eletricidade, proporcionando uma experiência completa multidisciplinar para a fixação dos conhecimentos adquiridos no curso.

A montagem do reator se deu em 4 etapas, o aproveitamento de um modelo técnico, a escolha dos equipamentos, os testes preliminares e a montagem final, os quais foram concluídos com sucesso, oportunizando novos tipos de desafios que não estão no escopo do curso, portanto a realização da montagem promoveu a ampliação dos horizontes do conhecimento em diversas áreas.

O teste de validação foi executado para demonstrar a efetividade do reator desenvolvido. O teste obteve como resultado uma excelente homogeneização da temperatura ao longo do reator, pois o gradiente de temperatura axial foi de apenas $0,4^{\circ}\text{C}$, sendo considerado desprezível.

O microcontrolador ESP32 manteve um bom desempenho durante todo o teste e conseguiu realizar o controle PID sem dificuldades, assim como os demais instrumentos também apresentaram bom comportamento.

6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Estudar a produção de algum composto comercialmente rentável;
- Estudar a existência de gradiente de temperatura radial;
- Utilização de uma técnica de controle avançado;
- Desenvolvimento de um reator contínuo.
- Realização de testes com os demais instrumentos presentes neste reator, como eficiência dos sensores de pH e de pressão.

REFERÊNCIAS

- ARDUINO. A. C. **Página inicial**. Disponível em: <https://create.arduino.cc>. Acesso em: 20 de set. de 2021.
- BAHETI, R; GILL, H. **Cyber-physical systems. Impact Control Technology**. Part 6, 2011.
- BEGA, E. A. et al. **Instrumentação Industrial**. 3 ed. Rio de Janeiro, Interciência, 2011.
- BIRD, R.B., STEWART, W.E, e LIGHTFOOT, E.N, **Fenômenos de Transporte**, 2a edição, Editora LTC, 2018.
- CARDOSO, D. A. L.; CHEBAR, I. E.; BELTRÃO, M. J. C. **Estudo da aplicabilidade de ferramentas da indústria 4.0 em uma planta de geração de energia a partir da reforma do biogás**. 2018. 95 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Química) - Departamento de Engenharia Química e de Petróleo, Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2018.
- ÇENGEL, Y. A. **Transferência de calor e massa: uma abordagem prática**; tradução Luiz Felipe Mendes de Moura; revisão técnica Kamal A. R. Ismail. 3 ed. São Paulo: McGraw-Hill, 2009.
- CHEMICAL INDUSTRY JOURNAL. **How Industry 4.0 is revolutionising the chemicals industry**. Disponível em: <http://www.chemicalindustryjournal.co.uk/industry-4-0-revolutionising-chemicals-industry>. Acesso em: 10 nov. 2021.
- COUPER, J. R. et al. **Chemical process equipment: selection and design**. 2 ed. Burlington, Elsevier, 2005.
- DE LEEUW, V. **INDUSTRIE 4.0: What Does It Mean for Chemical Companies?** Disponível em: <https://www.chemicalprocessing.com/articles/2017/industrie-4-0-what-does-it-mean-for-chemical-companies/?show=all>. Acesso em: 23 ago. 2021.
- DELOITTE. **Chemistry 4.0 growth through innovation in a transforming world**. Berlim, 2017.
- DIAS, E. F. **Estudo De Otimização Geométrica De Pás De Um Reator Cstr Em Seu Processo De Agitação Mecânica Da Mistura Reacional**. 2018. 55 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Química) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2018.
- ESPRESSIF. **Esp32, c2021. Página inicial**. Disponível em: <https://www.espressif.com/en/products/socs/esp32>. Acesso em: 20 set. 2021.
- FOGLER, H. S. **Elementos de Engenharia das Reações Químicas**. 4 ed. Rio de Janeiro, LTC, 2018.
- FROMENT, G. F. et al. **Chemical reactor analysis and design**. New York: Wiley, 1990.
- GIUSTO, D. et al. **The internet of things: 20th Tyrrhenian workshop on digital communications**. Editora: Springer, 2010.

GUBBI et al. Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions. **Future Generation Computer Systems**, v. 29, n. 7, p. 1645-1660, 2013.

INCROPERA F.P., DE WITT, D.P., **Transferência de Calor e de Massa**, 5a edição, Editora LTC. 2011.

ISHIDA, S. P. **Análise da eficiência de um reator tubular (PFR) submetido a diferentes modos de alimentação**. 2017. 65 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Química) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2017.

LEVENSPIEL, O. **Engenharia das Reações Químicas-Cálculo de Reatores**. São Paulo, Brasil: Edgard Blucher. 1972.

MCCABE, W. L., **Unit operations of chemical engineering**. 5 ed. Singapura, McGraw-Hill, 1993.

MUSHTAQ, F. **Analysis and Validation of Chemical Reactors performance models developed in a commercial software platform**. 2014. Master of Science Thesis - KTH School of Industrial Engineering and Management, 2013.

OGATA, Katsuhiko. **Engenharia de controle moderno**. Tradutora Heloísa Coimbra de Souza; revisor técnico Eduardo Aoun Tannuri. 5. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.

QIN, J.; LIU, Y.; GROSVENOR, R. A Categorical Framework of Manufacturing for Industry 4.0 and Beyond. **Procedia CIRP**, v. 52, p. 173–178, 2016.

RANADE, V. V. **Computational flow modeling for chemical reactor engineering**. London, England: Academic press, 2001.

SCHMAL, M. **Cinética e reatores: aplicação na engenharia química: teoria e exercícios**. Rio de Janeiro, Brasil; Synergia, 2010.

SHREVE, R. N. **Chemical process industries**. 4 ed. New York : McGraw-Hill, 1977.

SMITH C.A., CORRIPIO A. **Princípios e Prática do Controle Automático de Processo**. 3ªEd. Editora LTC, 2008.

VERGEL, J.L.G. **Estudo da influência da malha computacional, modelo de turbulência e aspectos numéricos da modelagem CFD em impelidores PBT usando malhas não estruturadas**. Dissertação de mestrado – Faculdade de Engenharia Química, UNICAMP, Campinas, 2013.