

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

GIOVANNA CAMPOS FERNANDES

***DETALHAMENTO DE PLANTA DE GASEIFICAÇÃO EM LEITO
FLUIDIZADO CIRCULANTE: MONTAGEM, INTEGRAÇÃO DOS
SISTEMAS DA USINA TERMOQUÍMICA EXPERIMENTAL DA UFU***

UBERLÂNDIA - MG

2026

GIOVANNA CAMPOS FERNANDES

DETALHAMENTO DE PLANTA DE GASEIFICAÇÃO EM LEITO
FLUIDIZADO CIRCULANTE: MONTAGEM, INTEGRAÇÃO DOS
SISTEMAS DA USINA TERMOQUÍMICA EXPERIMENTAL DA UFU

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade
de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de
Uberlândia como requisito parcial para obtenção do título
de bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Solidônio R. de Carvalho

UBERLÂNDIA - MG

2026

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

F363
2026 Fernandes, Giovanna Campos, 2003-
DETALHAMENTO DE PLANTA DE GASEIFICAÇÃO EM LEITO
FLUIDIZADO CIRCULANTE: MONTAGEM, INTEGRAÇÃO DOS
SISTEMAS DA USINA TERMOQUÍMICA EXPERIMENTAL DA UFU
[recurso eletrônico] / Giovanna Campos Fernandes. - 2026.

Orientador: Solidônio Rodrigues de Carvalho.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade
Federal de Uberlândia, Graduação em Engenharia Mecânica.

Modo de acesso: Internet.

Inclui bibliografia.

Inclui ilustrações.

1. Engenharia mecânica. I. Carvalho, Solidônio Rodrigues de,
1978-, (Orient.). II. Universidade Federal de Uberlândia.
Graduação em Engenharia Mecânica. III. Título.

CDU: 621

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:

Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091

Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074

GIOVANNA CAMPOS FERNANDES

DETALHAMENTO DE PLANTA DE GASEIFICAÇÃO EM LEITO
FLUIDIZADO CIRCULANTE: MONTAGEM, INTEGRAÇÃO DOS
SISTEMAS DA USINA TERMOQUÍMICA EXPERIMENTAL DA UFU

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade
de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de
Uberlândia como requisito parcial para obtenção do título
de bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Solidônio R. de Carvalho

Uberlândia, 2026

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Solidônio R. de Carvalho – Orientador

Universidade Federal de Uberlândia (UFU)

Prof. Dr. Gleyzer Martins – Examinador

Universidade Federal de Uberlândia (UFU)

Prof. Dr. João Rodrigo Andrade – Examinador

Universidade Federal de Uberlândia (UFU)

Agradecimentos

Primeiramente, agradeço a Deus, pois foi em Sua providência que encontrei força para enfrentar os desafios e coragem para perseverar diante dos obstáculos. A Ele entrego minha gratidão por todas as oportunidades concedidas, pelas pessoas colocadas em minha caminhada e pela graça de concluir mais esta importante etapa da minha formação.

À minha família, expresso minha mais profunda gratidão pelo amor incondicional, pelo incentivo constante e por todo o apoio oferecido durante essa caminhada. Vocês foram meu porto seguro nos momentos de dificuldade, celebraram comigo cada conquista e nunca deixaram que eu desistisse dos meus sonhos, mesmo diante dos desafios. Esta vitória também pertence a vocês.

Ao meu namorado, agradeço pelo companheirismo, pela paciência, pelo carinho e pelo incentivo constante. Sua compreensão e seu apoio tornaram essa caminhada mais leve e significativa, e sou muito grata por compartilhar este momento com você.

Aos professores da Universidade Federal de Uberlândia, manifesto minha sincera gratidão pelos conhecimentos compartilhados, pela dedicação ao ensino e por toda a contribuição para minha formação como engenheira mecânica.

À Secretaria de Desenvolvimento Econômico do Estado de Minas Gerais (SEDE-MG), à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), à Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP), à Empresa Brasileira de Pesquisa e Inovação Industrial (Embrapii) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo auxílio financeiro.

À empresa Sustentável SE, agradeço a oportunidade de realizar o estágio supervisionado e acompanhar a implantação de uma planta de gaseificação, experiência de grande importância para minha formação profissional. Estendo meu agradecimento a todos os profissionais que participaram da montagem da planta, pela colaboração, pelos ensinamentos e pela oportunidade de vivenciar, na prática, os desafios da engenharia.

Por fim, agradeço aos meus amigos pelo companheirismo, pelo incentivo e pelos momentos compartilhados ao longo dessa jornada. Levo comigo não apenas o conhecimento adquirido durante a graduação, mas também as amizades e as experiências que marcarão minha vida.

*"Sem o amor, todas as obras são
nada, mesmo as mais brilhantes."*

Santa Teresinha do Menino Jesus

Resumo

A crescente demanda por tecnologias capazes de promover o aproveitamento energético de resíduos tem impulsionado o desenvolvimento de sistemas de gaseificação como alternativa sustentável para geração de energia. Nesse contexto, o presente trabalho teve como objetivo acompanhar e descrever a implantação e o comissionamento de uma planta piloto de gaseificação em leito fluidizado circulante destinada à produção de gás de síntese a partir de Combustível Derivado de Resíduos (CDR). A metodologia adotada baseou-se no acompanhamento das etapas de montagem mecânica, instalações hidráulicas, elétricas e de instrumentação, integração dos sistemas e realização dos testes de comissionamento. Durante a implantação foram executadas as instalações do reator, ciclone, trocadores de calor, sistema de limpeza do gás, circuito hidráulico, infraestrutura elétrica, automação e sistemas auxiliares, além das interligações entre todos os equipamentos. Os testes a frio possibilitaram verificar a estanqueidade dos sistemas, o funcionamento dos equipamentos, a parametrização dos dispositivos de controle e a correção de não conformidades identificadas durante o processo de implantação. Os resultados demonstraram que o planejamento da montagem e o adequado comissionamento foram fundamentais para garantir a integração dos sistemas, a segurança operacional e a preparação da planta para as etapas de operação. O trabalho contribui para a documentação técnica da implantação de plantas de gaseificação e evidencia a importância do comissionamento como etapa indispensável para a confiabilidade operacional de sistemas termoquímicos.

Palavras – chave: gaseificação; montagem; comissionamento; leito fluidizado circulante; gás de síntese; combustível derivado de resíduos (CDR).

Abstract

The growing demand for technologies capable of promoting the energy recovery of waste has driven the development of gasification systems as a sustainable alternative for energy generation. In this context, the present study aimed to monitor and describe the implementation and commissioning of a pilot-scale circulating fluidized bed gasification plant designed for syngas production from Refuse-Derived Fuel (RDF). The adopted methodology consisted of monitoring the stages of mechanical assembly, hydraulic, electrical, and instrumentation installations, system integration, and commissioning tests. During the implementation phase, the reactor, cyclone, heat exchangers, gas cleaning system, hydraulic circuit, electrical infrastructure, automation system, and auxiliary equipment were installed, in addition to the interconnection of all process units. Cold commissioning tests were carried out to verify system tightness, equipment operation, control device parameterization, and the correction of nonconformities identified during the implementation process. The results demonstrated that proper assembly planning and effective commissioning were essential to ensure system integration, operational safety, and plant readiness for subsequent operational stages. This study contributes to the technical documentation of gasification plant implementation and highlights the importance of commissioning as an essential step in ensuring the operational reliability of thermochemical systems.

Keywords: gasification; assembly; commissioning; circulating fluidized bed; syngas; Refuse-Derived Fuel (RDF).

Lista de Ilustrações

Figura 1.1 – Aplicações do gás de síntese.....	13
Figura 1.2 – a) Realidade Virtual da planta em estudo.....	14
Figura 1.2 – b) foto retirada em maio de 2026	14
Figura 2.1 – Objetivo da planta.....	16
Figura 2.2 – Desenho do Sistema de Alimentação.....	18
Figura 2.3 – Instalação do reator em 2025.....	20
Figura 2.4 – Montagem do refratário no reator em 2026.....	21
Figura 2.5 – Montagem da grelha no plenum.....	22
Figura 2.6 – Instalação dos trocadores de calor curvo e reto.....	23
Figura 2.7 – Desenho do Sistema de Lavagem dos Gases.....	24
Figura 2.8 – Lavador Venturi.....	26
Figura 2.9 – Lavador Scrubber.....	27
Figura 2.10 – Tanque de Decantação.....	28
Figura 2.11 – Raspador de Particulado Flutuante.....	29
Figura 2.12 – Raspador de Particulado Denso – Parte Motora.....	30
Figura 2.13 – Torre de Resfriamento.....	31

Figura 2.14 – Purgador.....	32
Figura 3.1 – Arranjo Geral da Planta.....	35
Figura 3.2 – Válvulas alimentadoras em 2025.....	36
Figura 3.3 – Revestimento do reator feito em 2025.....	37
Figura 3.4 – Sopradores.....	38
Figura 3.5 – Vista superior do Tanque de Decantação.....	39
Figura 3.6 – Central Hidráulica.....	41
Figura 3.7 – a) Válvula Reguladora de Pressão.....	42
Figura 3.7 – b) Válvula Reguladora de Vazão.....	42
Figura 3.8 – Planta em estudo.....	43
Figura 4.1 – Conclusão da estrutura do prédio de gaseificação.....	48
Figura 4.2 – Fechamento do prédio de gaseificação em 2026.....	49
Figura 4.3 – Bombas de água.....	50
Figura 4.4 – Infraestrutura elétrica.....	52
Figura 4.5 – Tela principal IHM.....	54
Figura 4.6 – Parametrização das válvulas de alimentação.....	55
Figura 4.7 – Tampa superior soldada.....	58
Figura 4.8 – Bico pulverizador em funcionamento.....	59

Figura 4.9 – Verificação da estanqueidade da tubulação.....	61
Figura 4.10 – Painel dos inversores dos sopradores.....	62
Figura 4.11 – Balanceamento dos rotores.....	63
Figura 4.12 – Içamento de um bag.....	64
Figura 4.13 – a) Motor afetado pela corrosão.....	65
Figura 4.13 – b) Motor rebobinado.....	65
Figura 4.14 – Alimentação do silo.....	66
Figura 4.15 – Rosca alimentadora em teste.....	67
Figura 4.16 – Instalação dos sensores de fim de curso.....	68
Figura 4.17 – Silo com cigarro após funcionamento do moto vibrador.....	69
Figura 4.18 – Teste de acionamento do flare.....	70

Lista de Abreviaturas e Siglas

ASTM American Society for Testing and Materials

Ca(OH)₂ Hidróxido de Cálcio

CDR Combustível Derivado de Resíduo

CFB Circulating Fluidized Bed

CLP Controlador Lógico Programável

CO₂ Dióxido de Carbono

GLP Gás Liquefeito de Petróleo

IHM Interface Homem-Máquina

RDF Refuse-Derived Fuel

UFU Universidade Federal de Uberlândia

Sumário

1.	Introdução	12
2.	Revisão Bibliográfica	15
2.1	Gás de Síntese – Syngas	16
2.2	Sistema de Alimentação.....	17
2.3	Reator de Gaseificação	18
2.4	Trocador de Calor	22
2.5	Unidades de Limpeza e Condicionamento do Gás	23
2.5.1	Ciclone.....	25
2.5.2	Lavador Venturi	25
2.5.3	Lavador Scrubber	26
2.5.4	Tanque de Decantação	27
2.5.5	Sistema de Remoção de Partículas Flutuantes	29
2.5.6	Sistema de Remoção de Partículas Densas.....	29
2.5.7	Torre de Resfriamento	30
2.6	Purgador de Linha	31
2.7	Sistema de Conversão Energética - Geração de Vapor e Produção de Energia	32

3. Metodologia.....	34
4. Resultados e Discussão.....	46
5. Conclusão	72
Referências	73

1. Introdução

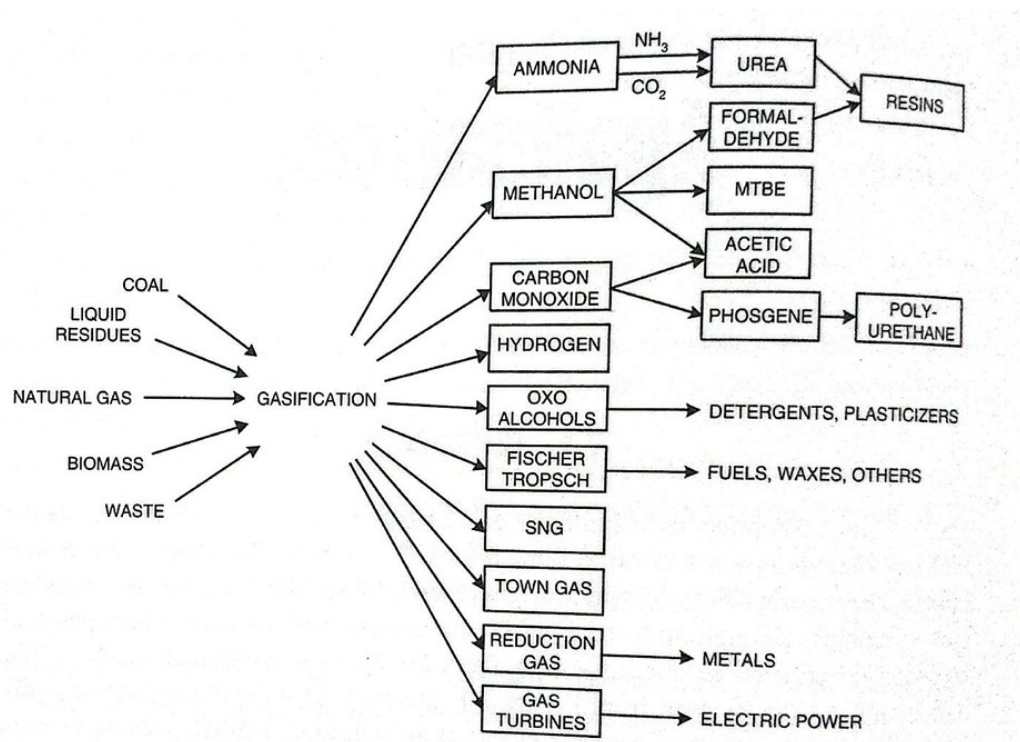
Motivada pela demanda mundial de fontes energéticas, atrelada à necessidade de redução dos impactos ambientais, tem-se o fortalecimento do desenvolvimento de tecnologias alternativas e sustentáveis para a geração energética. Nesse contexto a gaseificação destaca-se como um processo termoquímico eficiente na conversão de resíduos em gás de síntese, possibilitando sua utilização em diferentes aplicações energéticas. Ademais, a crescente preocupação com a destinação dos resíduos sólidos, por exemplo com o fim dos lixões e dos aterros, encontra na gaseificação uma fonte de destino alternativa promissora. Sendo possível considerar até mesmo a recuperação de lixões e aterros ao permitir o aproveitamento energético de materiais residuais por meio da produção de gás de síntese contribuindo tanto para a diversificação da matriz energética quanto para a mitigação de impactos ambientais.

De acordo com a literatura, a gaseificação consiste em um processo termoquímico de conversão de materiais carbonáceos em gás combustível por meio de reações de oxidação parcial em elevadas temperaturas. O processo ocorre com quantidade limitada de oxigênio, permitindo a formação de um gás de síntese rico em monóxido de carbono e hidrogênio, passível de utilização em sistemas de geração de energia e aplicações industriais. Diante da necessidade de soluções energéticas mais eficientes e sustentáveis, o estudo e a implantação de plantas de gaseificação tornam-se relevantes no contexto da engenharia.

Uma planta de gaseificação permite a conversão de diferentes tipos de matéria-prima em gás de síntese, o qual pode ser empregado na geração de energia elétrica e térmica, além de servir como insumo para outros processos industriais. Dessa forma, essa tecnologia contribui não apenas para a diversificação da matriz energética, mas também para a valorização de resíduos e redução da dependência de combustíveis fósseis. A flexibilidade do syngas possibilita sua utilização em diferentes escalas, desde pequenas unidades descentralizadas até plantas industriais de grande porte. No contexto da planta em análise, o resíduo processado que irá compor o CDR (Combustível Derivado de Resíduo), é oriundo de uma parceria entre a UFU e a Receita Federal, a qual tem como

objetivo a destinação de cargas de cigarros apreendidos. Neste caso, o syngas está sendo utilizado para a produção de vapor em caldeira, onde posteriormente o vapor gerado será convertido em energia em uma turbina.

Figura 1.1 – Aplicações do gás de síntese.



Fonte: HIGMAN, 2008.

Diferentemente de estudos baseados exclusivamente em simulações computacionais ou análises teóricas, o presente trabalho está fundamentado na implantação e na avaliação operacional de uma planta piloto de gaseificação, contemplando as etapas de montagem dos equipamentos, integração dos sistemas auxiliares e testes operacionais. Essa abordagem permite correlacionar os fundamentos teóricos da gaseificação com os desafios práticos encontrados durante a implementação de uma unidade industrial, contribuindo para o desenvolvimento tecnológico da área e para futuras aplicações da tecnologia em sistemas de formação de combustíveis.

Do ponto de vista da engenharia, o estudo da implantação de uma planta de gaseificação envolve a aplicação integrada de conhecimentos em termodinâmica, fenômenos de transporte e engenharia de processos. Além disso, demanda a realização de

balanços de massa e energia, o dimensionamento de equipamentos e a análise do desempenho do sistema, tornando-se um tema relevante para a formação acadêmica e profissional do engenheiro mecânico. Adicionalmente, a abordagem proposta neste trabalho apresenta relevância prática, uma vez que contribui para a compreensão dos desafios técnicos associados à implantação de sistemas de conversão termoquímica, podendo servir como base para estudos futuros e aplicações reais no setor energético. Assim, o desenvolvimento deste trabalho justifica-se pela sua contribuição tanto no âmbito acadêmico quanto no contexto tecnológico e ambiental.

Figura 1.2 – a) Realidade Virtual da planta em estudo e b) foto retirada em maio de 2026.

a)



b)



2. Revisão Bibliográfica

A gaseificação é um processo termoquímico de oxidação parcial no qual materiais carbonáceos, como carvão mineral, biomassa ou resíduos sólidos, são convertidos em um gás combustível denominado gás de síntese (syngas), composto principalmente por monóxido de carbono, hidrogênio e metano, sob condições controladas de temperatura e quantidade limitada de agente oxidante. (BASU, 2018; HIGMAN; VAN DER BURGT, 2008; CARPENTER, 2010)

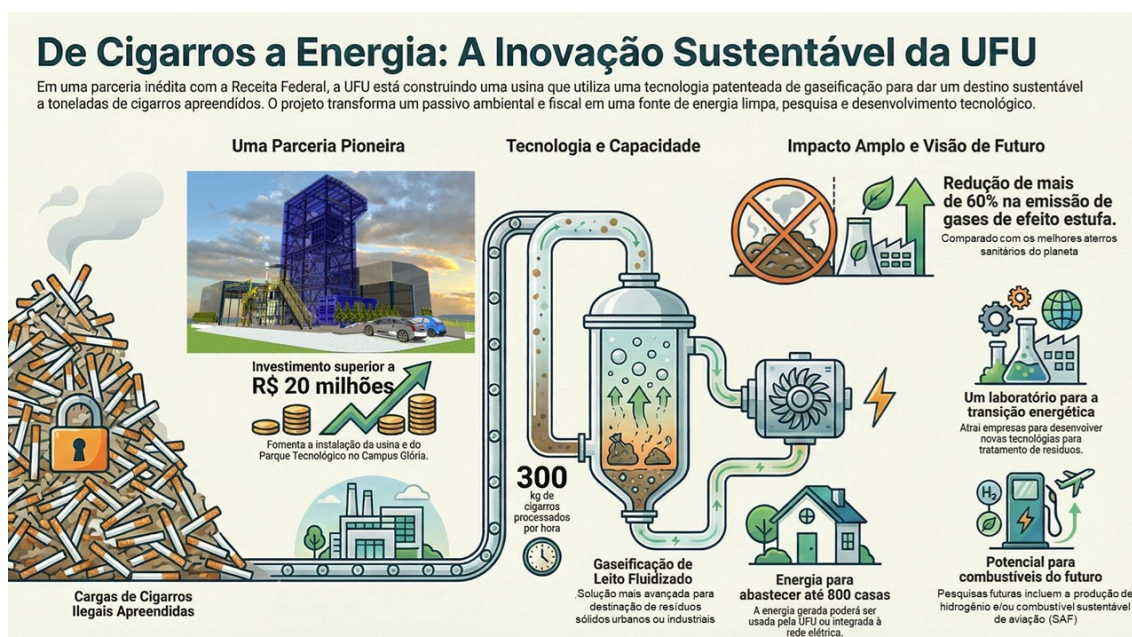
A conversão da biomassa ocorre por meio de quatro etapas principais: secagem, pirólise, oxidação e redução. Na secagem ocorre a evaporação da umidade do combustível; na pirólise, a matéria orgânica sofre decomposição térmica gerando carvão, gases e compostos voláteis; na oxidação ocorre a combustão parcial, responsável pelo fornecimento de energia ao processo; e, finalmente, na redução são produzidos os principais gases combustíveis do syngas por meio das reações entre carbono, vapor d'água e dióxido de carbono (BASU, 2018).

A biomassa constitui uma fonte renovável de energia formada por materiais orgânicos de origem vegetal, animal ou provenientes de resíduos industriais e urbanos. Sua utilização em processos termoquímicos permite a conversão da energia química armazenada na matéria orgânica em combustíveis gasosos, líquidos ou sólidos. Entre as principais vantagens da biomassa destacam-se a renovabilidade, a redução das emissões líquidas de dióxido de carbono e a possibilidade de aproveitamento energético de resíduos que, de outra forma, seriam destinados a aterros sanitários. As propriedades físico-químicas da biomassa, como teor de umidade, granulometria, teor de cinzas e composição elementar, exercem influência direta sobre o desempenho do processo de gaseificação e sobre a qualidade do gás produzido (BASU, 2018).

Para a planta em análise a biomassa utilizada é o Combustível Derivado de Resíduos (CDR), que consiste em um combustível sólido obtido a partir do processamento de resíduos sólidos urbanos ou industriais, submetidos a etapas de segregação, trituração, secagem e classificação granulométrica. O objetivo desse

processamento é concentrar os materiais de elevado poder calorífico e reduzir a presença de componentes inertes e contaminantes, tornando o combustível mais homogêneo e adequado para processos de recuperação energética. A utilização de CDR em sistemas de gaseificação contribui para a redução da disposição de resíduos em aterros sanitários e promove o aproveitamento energético de materiais anteriormente considerados rejeitos, inserindo-se no contexto da economia circular e da gestão sustentável de resíduos (ABNT NBR 16849:2020).

Figura 2.1 – Objetivo da planta.



2.1 Gás de Síntese – Syngas

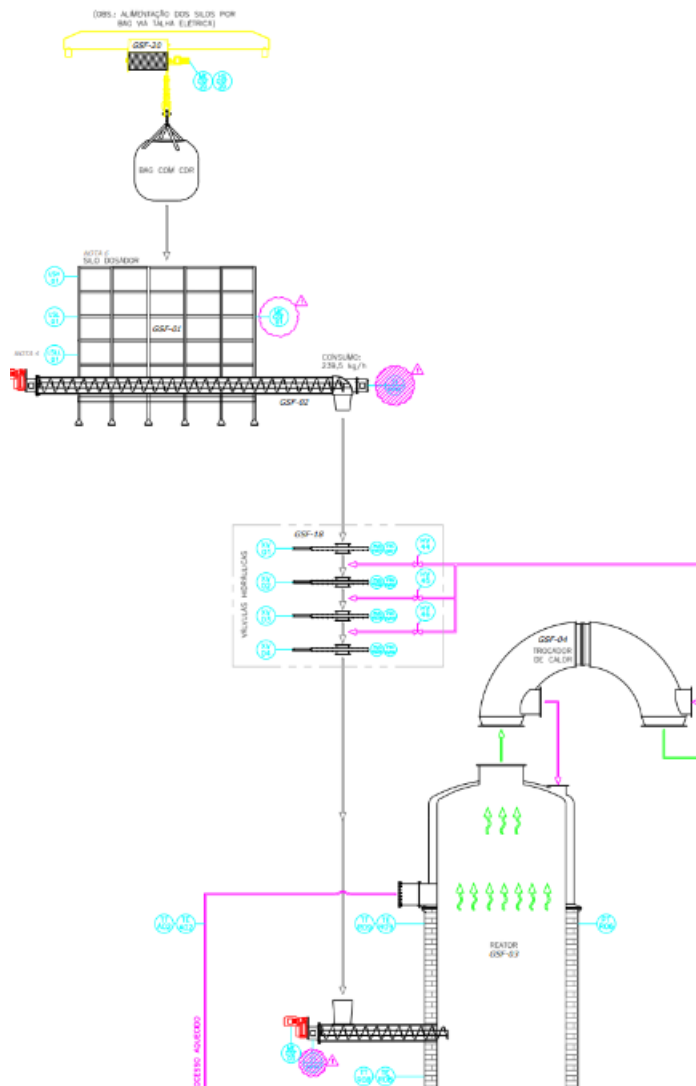
O gás de síntese é o principal produto da gaseificação e possui características que o tornam versátil para diversas aplicações, sendo uma mistura gasosa combustível formada principalmente por monóxido de carbono, hidrogênio e pequenas quantidades de metano, dióxido de carbono, nitrogênio e hidrocarbonetos leves. Sua composição depende da matéria-prima empregada, da tecnologia de gaseificação e das condições operacionais, como temperatura, pressão e relação entre combustível e agente gaseificante. Essas variáveis influenciam diretamente o poder calorífico e a aplicação do gás produzido (HIGMAN; VAN DER BURGT, 2008; REED; DAS, 1988).

Além do aproveitamento para geração de energia térmica e elétrica diretamente como combustível gasoso, a composição do gás de síntese produzido favorece a aplicação em processos de síntese química destinados à obtenção de combustíveis convencionais. A presença de monóxido de carbono (CO) e hidrogênio (H₂), principais constituintes do syngas, fornece os elementos fundamentais para diversas rotas de conversão termoquímica e catalítica, permitindo a produção de compostos de maior valor agregado. Entre essas rotas destacam-se a síntese de metanol, a produção de combustíveis líquidos por meio do processo Fischer-Tropsch e a obtenção de hidrocarbonetos leves utilizados como matérias-primas na indústria química, por exemplo metanol e amônia. Dessa forma, além de seu aproveitamento energético imediato, o gás de síntese apresenta potencial como intermediário químico para a formação de combustíveis amplamente utilizados nos setores de transporte e geração de energia, ampliando as possibilidades de aplicação da tecnologia de gaseificação, tornando-a uma alternativa promissora para a valorização energética de resíduos e biomassa (HIGMAN; VAN DER BURGT, 2008).

2.2 Sistema de Alimentação

O sistema de alimentação é responsável por garantir o fornecimento contínuo e controlado da biomassa ao reator de gaseificação, desempenhando papel fundamental na estabilidade operacional da planta. Esse sistema é composto pela talha elétrica de alimentação, silo de CDR, rosca alimentadora de CDR e quatro válvulas alimentadoras, que trabalham de forma integrada para manter uma vazão constante de combustível. Para monitorar o nível de biomassa, o silo foi equipado com sensores instalados em três alturas distintas, responsáveis por enviar sinais ao centro de controle e operações sobre a quantidade de biomassa armazenada. Além de regular a quantidade de biomassa introduzida no reator, o sistema deve impedir a entrada excessiva de ar atmosférico, evitando alterações indesejadas nas condições de gaseificação. A uniformidade da alimentação influencia diretamente a distribuição térmica no interior do gaseificador, a eficiência das reações termoquímicas e a qualidade do gás produzido.

Figura 2.2 – Desenho do Sistema de Alimentação.



2.3 Reator de Gaseificação

O reator de gaseificação constitui o núcleo da planta e é o equipamento responsável pela conversão termoquímica da biomassa em gás de síntese. O reator desta planta é de leito fluidizado, tecnologia amplamente utilizada em aplicações industriais devido à sua elevada eficiência térmica, flexibilidade operacional e capacidade de processar diferentes tipos de biomassa e resíduos.

Os gaseificadores de leito fluidizado apresentam elevada eficiência devido ao intenso contato entre as partículas do leito, a biomassa e o agente gaseificante. A fluidização promove excelente mistura dos reagentes, elevada transferência de calor e temperatura mais uniformes ao longo do reator, favorecendo maior conversão do combustível e estabilidade operacional. Essas características tornam essa tecnologia adequada para aplicações industriais e para o processamento de diferentes tipos de biomassa (KUNII; LEVENSPIEL, 1991; BASU, 2018).

Ademais, o reator empregado na planta é do tipo leito fluidizado circulante (Circulating Fluidized Bed – CFB), tecnologia caracterizada pela elevada velocidade do agente gaseificante, suficiente para promover o arraste contínuo das partículas do leito juntamente com o fluxo gasoso. Após a separação em um ciclone, essas partículas são recirculadas ao reator, estabelecendo um circuito fechado que proporciona intensa mistura entre combustível, material inerte e agente gaseificante. Esse mecanismo resulta em elevada uniformidade de temperatura, excelente transferência de calor e de massa e maior eficiência das reações termoquímicas, reduzindo gradientes térmicos e favorecendo uma conversão mais completa do Combustível Derivado de Resíduos (CDR). Além disso, a recirculação das partículas aumenta o tempo de residência dos sólidos no sistema, contribuindo para maior eficiência de conversão do carbono e maior rendimento na produção de gás de síntese (KUNII; LEVENSPIEL, 1991; BASU, 2006; HIGMAN; VAN DER BURGT, 2008).

O funcionamento do reator em análise baseia-se na fluidização de um leito constituído por partículas inertes, geralmente areia de sílica, por meio da injeção controlada do agente gaseificante na região inferior do equipamento. Quando a velocidade do fluxo ascendente atinge a velocidade mínima de fluidização, as partículas passam a comportar-se como um fluido, promovendo intensa mistura entre o leito, a biomassa e os gases de reação. Essa condição proporciona excelente transferência de calor e de massa, mantendo uma distribuição homogênea da temperatura e favorecendo a conversão da matéria-prima em gás de síntese. Em comparação aos gaseificadores de leito fixo, os reatores de leito fluidizado apresentam maior estabilidade operacional, melhor controle da temperatura e maior eficiência na conversão do carbono, reduzindo a formação de zonas de superaquecimento e aumentando o rendimento do processo.

O reator é construído em aço carbono ASTM A56 com revestimento interno refratário, capaz de suportar temperaturas de até 1200 °C e minimizar perdas térmicas para o ambiente. Em seu interior ocorrem sucessivamente as etapas de secagem, pirólise, oxidação e redução, responsáveis pela transformação da matéria-prima em uma mistura gasosa rica em monóxido de carbono, hidrogênio e hidrocarbonetos leves. O correto dimensionamento do reator é essencial para garantir tempo de residência adequado, distribuição uniforme dos fluxos de ar e biomassa, estabilidade térmica e elevada conversão do combustível sólido em gás combustível. Ao longo do corpo do reator, encontram-se sensores de temperatura e pressão instalados, para verificar a manutenibilidade da temperatura de processo desejada de 850 °C.

Figura 2.3 – Instalação do reator em 2025.



Figura 2.4 – Montagem do refratário no reator em 2026.



O tempo de permanência do CDR no interior do reator e o controle da temperatura são de extrema importância, por exemplo para evitar a formação do alcatrão. O alcatrão constitui um dos principais desafios operacionais dos sistemas de gaseificação, sendo formado por uma mistura complexa de hidrocarbonetos aromáticos e compostos orgânicos condensáveis gerados durante a pirólise da biomassa. A presença desses compostos pode provocar incrustações, entupimentos, corrosão e redução da eficiência dos equipamentos de limpeza e conversão energética. A formação de alcatrão está diretamente relacionada à temperatura de operação, ao tempo de residência dos gases e à eficiência das reações de craqueamento térmico. Processos conduzidos em temperaturas elevadas e com adequada mistura entre combustível e agente gaseificante tendem a minimizar sua formação, favorecendo a produção de um syngas composto predominantemente por moléculas gasosas leves (BASU, 2018; HIGMAN; VAN DER BURGT, 2008).

Ademais, entre o plenum e o corpo do reator propriamente dito, há a grelha, também denominada placa distribuidora de ar, que promove a distribuição uniforme do agente gaseificante na base do leito fluidizado. Sua principal função é garantir que o fluxo

de ar seja distribuído de maneira homogênea por toda a seção transversal do reator, proporcionando a fluidização adequada do material inerte e da biomassa. O correto dimensionamento da grelha é fundamental para evitar a formação de canais preferenciais de escoamento (*channeling*), zonas mortas e regiões de má fluidização, que comprometem a eficiência das reações termoquímicas e reduzem o rendimento da produção de gás de síntese. Para isso, a placa é confeccionada em material metálico resistente às elevadas temperaturas de operação (inox 310H) e possui uma distribuição uniforme de orifícios calibrados, responsáveis por impor uma perda de carga controlada e assegurar que o ar seja igualmente distribuído em todo o leito. Além de sustentar mecanicamente as partículas do leito quando o sistema está inoperante, a grelha contribui para a estabilidade operacional do gaseificador, favorecendo a intensa mistura entre a biomassa, o material inerte e o agente gaseificante, condição essencial para uma elevada transferência de calor e de massa e para a obtenção de um processo de gaseificação eficiente e estável.

Figura 2.5 – Montagem da grelha no plenum.



2.4 Trocador de Calor

Visando aumentar a eficiência global da planta de gaseificação, foi adotado um sistema de recuperação térmica por meio de trocadores de calor. O primeiro consiste em um trocador de calor curvo, responsável por interligar o ciclone localizado no interior do

reator a um trocador de calor reto, conduzindo o gás de síntese ainda em elevada temperatura entre esses equipamentos. Essa configuração permite o aproveitamento da energia térmica contida no gás para o pré-aquecimento do ar de processo utilizado na gaseificação, reduzindo a necessidade de fornecimento de energia externa. A recuperação de calor promove maior eficiência térmica do sistema, diminui as perdas energéticas e contribui para o aumento do rendimento global da conversão energética. Além disso, o reaproveitamento da energia disponível nos gases quentes torna o processo mais sustentável e economicamente viável, uma vez que reduz o consumo energético auxiliar e melhora o aproveitamento do potencial calorífico do combustível.

Figura 2.6 – Instalação dos trocadores de calor curvo e reto.



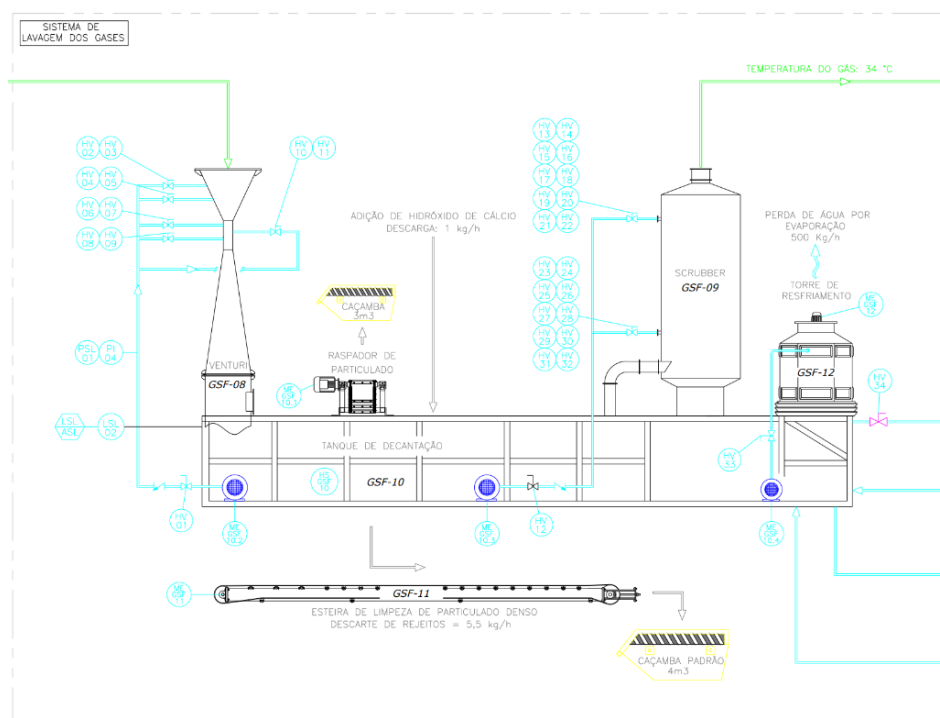
2.5 Unidades de Limpeza e Condicionamento do Gás

As unidades de limpeza do gás têm a função de remover partículas sólidas, cinzas, alcatrões e demais contaminantes presentes no gás de síntese produzido no gaseificador, assegurando sua utilização segura nos equipamentos de geração de energia. Inicialmente, o gás passa por um ciclone separador, responsável pela remoção das partículas mais grosseiras por meio da ação da força centrífuga, são removidas partículas de até 0,01 mm. Em seguida, o fluxo é direcionado ao lavador venturi, onde partículas mais finas são

capturadas pelo contato intenso com gotículas de água em alta velocidade. Neste caso, a água é aspergida a partir de bicos aspersores do tipo cone vazio, em alta velocidade, de modo que as gotículas impactam as partículas sólidas presentes no fluxo gasoso, transferindo quantidade de movimento e favorecendo sua captura e remoção. Posteriormente, o gás é conduzido ao lavador scrubber, equipamento responsável pela remoção final de particulados, a partir de uma névoa de água proporcionada por bicos aspersores do tipo cone cheio, tal atmosfera propicia o resfriamento do fluxo gasoso, que promove a condensação de contaminantes remanescentes. Na parte interna do lavador scrubber é inserido um ciclone, que favorece o impacto do particulado contra as suas paredes favorecendo o processo de lavagem do gás.

Os lavadores venturi e scrubber atuam de forma complementar no sistema de limpeza do gás de síntese. Enquanto o venturi é responsável pela captura das partículas por meio da intensa interação entre água e gás, o scrubber atua na etapa subsequente promovendo a separação entre o gás limpo e a água carregada de contaminantes. Dessa forma, a combinação dos dois equipamentos permite elevar significativamente a qualidade do gás produzido, tornando-o mais adequado para utilização em sistemas de geração de energia.

Figura 2.7 – Desenho do Sistema de Lavagem dos Gases.



2.5.1 *Ciclone*

Após a saída do gaseificador, o gás de síntese é direcionado para um ciclone separador, cuja função é remover partículas sólidas arrastadas pelo fluxo gasoso. Os ciclones são equipamentos amplamente empregados na separação de partículas sólidas presentes em correntes gasosas. Seu funcionamento baseia-se na geração de um movimento rotacional que produz força centrífuga suficiente para deslocar as partículas de maior densidade em direção às paredes do equipamento, permitindo sua coleta na parte inferior. Sua simplicidade construtiva, baixo custo de manutenção e elevada resistência a altas temperaturas justificam sua ampla utilização em plantas de gaseificação (PERRY; GREEN, 2008).

O ciclone da planta em análise foi dimensionado para reter partículas com diâmetro superior a aproximadamente 10 μm , utilizando a força centrífuga gerada pelo movimento rotacional do gás. Embora seja possível aumentar a eficiência de separação para partículas menores por meio da redução do diâmetro do ciclone, essa modificação resultaria em um aumento significativo da perda de carga do sistema, elevando o consumo energético dos equipamentos de movimentação dos gases e comprometendo a viabilidade operacional da planta. Dessa forma, optou-se por um compromisso entre eficiência de separação e desempenho energético.

2.5.2 *Lavador Venturi*

Após a separação inicial das partículas no ciclone, o gás passa por um lavador venturi, responsável pela remoção de particulados mais finos. O equipamento opera por meio da injeção de água em uma região de alta velocidade do escoamento, formando uma barreira líquida que promove intenso contato entre as gotículas de água e as partículas suspensas no gás. Devido à elevada velocidade relativa entre as fases, ocorre o impacto das partículas contra as gotículas, favorecendo sua captura e incorporação ao líquido. Esse mecanismo proporciona uma elevada eficiência na remoção de partículas finas e contribui para o condicionamento do gás antes das etapas subsequentes de tratamento. Vale ressaltar, que a eficiência desse equipamento aumenta à medida que cresce a velocidade relativa entre as fases, embora isso também resulte em maior perda de carga no sistema (PERRY; GREEN, 2008).

Figura 2.8 – Lavador Venturi.



2.5.3 *Lavador Scrubber*

Na sequência do processo, o gás é conduzido para um lavador do tipo scrubber, cuja função principal é remover os últimos particulados remanescentes e promover o resfriamento do gás. O equipamento utiliza um sistema de pulverização que gera uma névoa fina de água, aumentando a área de contato entre as fases líquida e gasosa (PERRY; GREEN, 2008). Além disso, o scrubber possui um sistema interno que induz o movimento ciclônico do fluxo, promovendo impactos adicionais contra as paredes do equipamento e aumentando a eficiência de separação. Durante o processo, a redução da temperatura do gás favorece a condensação de vapores e a aglomeração de partículas, que passam a escoar juntamente com a água pelas paredes do lavador até o tanque de decantação.

Figura 2.9 – Lavador Scrubber.



2.5.4 *Tanque de Decantação*

O tanque de decantação é um dos principais componentes do sistema de tratamento da água utilizada na limpeza do gás de síntese, sendo responsável pela separação dos sólidos transportados pelos lavadores úmidos. A decantação constitui uma operação unitária baseada na diferença de densidade entre as fases sólida e líquida. Em sistemas de lavagem de gases, o processo permite a sedimentação gravitacional das partículas transportadas pela água de recirculação, reduzindo a concentração de sólidos suspensos e possibilitando o reaproveitamento da água no processo industrial. A eficiência da decantação depende do tempo de residência da água no tanque, da granulometria das partículas e das condições hidráulicas do reservatório (PERRY; GREEN, 2008).

Após a passagem do gás pelo lavador venturi e pelo scrubber, a água empregada na remoção de partículas é direcionada ao tanque de decantação. Nesse reservatório, a redução da velocidade do escoamento favorece a ação da gravidade, permitindo que as

partículas de maior densidade sedimentem no fundo do tanque, enquanto materiais de menor densidade, como óleos e compostos orgânicos leves, permanecem na superfície. Essa separação física possibilita a recirculação da água parcialmente limpa para o sistema de lavagem, reduzindo o consumo hídrico da planta e aumentando sua eficiência operacional. O tanque é equipado com sistemas mecânicos de remoção de resíduos, incluindo um raspador de fundo acionado por correntes para a retirada contínua dos sedimentos decantados e um raspador superficial destinado à remoção de materiais flutuantes.

Figura 2.10 – Tanque de Decantação.



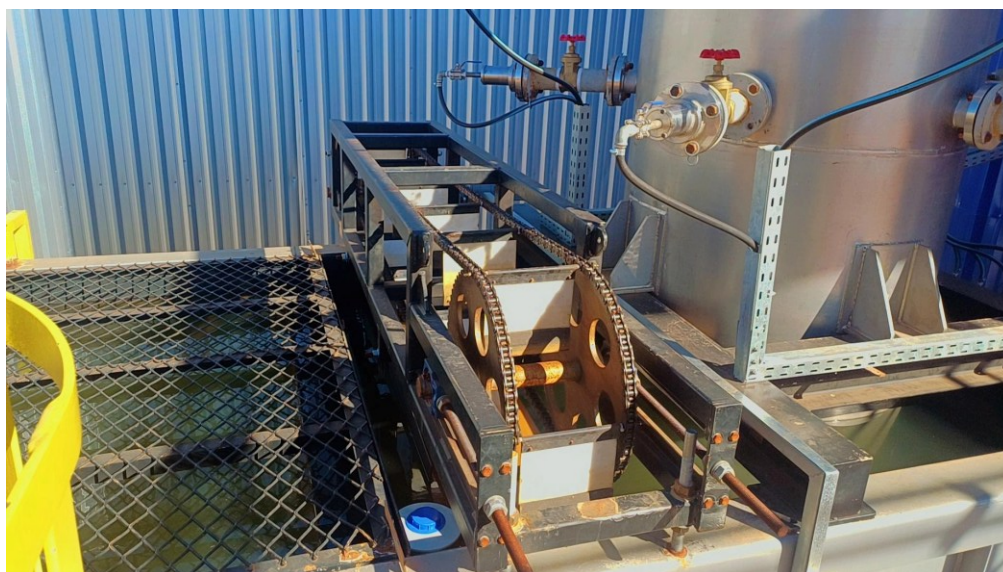
A água de recirculação armazenada no tanque de decantação recebe tratamento químico por meio da adição de hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2), com a finalidade de adequar suas características físico-químicas para reutilização no sistema de lavagem dos gases. A dosagem do reagente promove a elevação do pH da água, favorecendo a precipitação de compostos dissolvidos, a coagulação de partículas finas e a redução da solubilidade de determinados contaminantes. Como consequência, melhora-se a eficiência do processo de decantação, facilitando a separação dos sólidos em suspensão e contribuindo para a manutenção da qualidade da água recirculada aos lavadores Venturi e Scrubber. Além disso, o controle do pH auxilia na minimização de processos corrosivos nas tubulações e equipamentos que compõem o circuito hidráulico da planta. Dessa forma, o tanque de decantação desempenha um papel essencial na manutenção da qualidade da água de processo, na proteção das bombas de recirculação e na

confiabilidade das unidades de limpeza do gás, contribuindo para o funcionamento contínuo e eficiente da planta de gaseificação.

2.5.5 *Sistema de Remoção de Partículas Flutuantes*

O tanque de decantação do sistema de lavagem possui um mecanismo raspador destinado à remoção de materiais que se acumulam na superfície do líquido. Esse sistema é responsável pela retirada de partículas flutuantes, materiais em suspensão e possíveis frações oleosas formadas durante o processo. A formação de compostos oleosos pode ocorrer quando a conversão termoquímica da biomassa não é completa, resultando na presença de hidrocarbonetos de maior massa molecular, como compostos superiores ao pentano. Devido à diferença de densidade entre esses materiais e a água, ocorre sua flutuação, permitindo sua remoção mecânica pelo sistema raspador e contribuindo para a manutenção da qualidade da água de processo.

Figura 2.11 – Raspador de Particulado Flutuante.



2.5.6 *Sistema de Remoção de Partículas Densas*

O sistema de remoção de particulado denso é responsável pela retirada contínua dos sólidos sedimentados no fundo do tanque de decantação. Durante a operação da planta, partículas de maior densidade, como cinzas, areia, fragmentos de carvão e outros resíduos minerais, são transportadas pela água proveniente dos lavadores e, devido à ação da gravidade, decantam no fundo do reservatório. Para evitar o acúmulo desses materiais

e preservar a eficiência do sistema, o tanque é equipado com um raspador de fundo acionado por um sistema de tração por correntes. Esse mecanismo consiste em duas correntes laterais sincronizadas, acionadas por um conjunto moto redutor, às quais são fixadas lâminas raspadoras que se deslocam lentamente ao longo do fundo do tanque. Durante o movimento, as lâminas conduzem o material sedimentado até um canal de descarga, de onde os resíduos são removidos para descarte. O acionamento por correntes proporciona elevada robustez mecânica, operação contínua e capacidade de transportar grandes volumes de sedimentos abrasivos, características essenciais para aplicações industriais. Além disso, esse sistema reduz a necessidade de limpezas manuais, evita a obstrução das bombas de recirculação e das tubulações, preserva o volume útil do tanque e contribui para a estabilidade operacional das unidades de limpeza do gás, aumentando a confiabilidade e a vida útil dos equipamentos da planta.

Figura 2.12 – Raspador de Particulado Denso – Parte Motora.



2.5.7 *Torre de Resfriamento*

Após a etapa de decantação, a água utilizada nos lavadores apresenta temperatura elevada em decorrência da absorção do calor proveniente do gás de síntese. Para que essa água possa ser reutilizada de forma eficiente no processo, ela é encaminhada para uma torre de resfriamento, cuja função é reduzir sua temperatura antes do retorno ao sistema de lavagem. O resfriamento ocorre por meio do contato entre a água aquecida e uma corrente de ar atmosférico, promovendo a transferência de calor principalmente por evaporação de uma pequena fração da água e, em menor escala, por convecção. Esse processo permite que a água retorne ao circuito em condições térmicas adequadas,

garantindo maior eficiência na remoção de partículas e no resfriamento do gás de síntese, além de reduzir o consumo hídrico e aumentar a eficiência operacional de circuitos fechados de refrigeração (INCROPERA et al., 2014).

Figura 2.13 – Torre de Resfriamento.



2.6 Purgador de Linha

Após as etapas de limpeza e condicionamento realizadas pelo lavador venturi e pelo scrubber, o gás de síntese é conduzido a um purgador de linha, cuja função é promover a separação final de condensados líquidos e de eventuais partículas remanescentes transportadas pelo fluxo gasoso. Durante o resfriamento do gás ao longo do sistema de lavagem, parte do vapor d'água e dos compostos condensáveis presentes no syngas transforma-se em fase líquida, podendo formar condensados que, se não forem removidos, comprometem a eficiência da combustão e podem causar corrosão, incrustações ou danos aos equipamentos instalados a jusante (BABCOCK & WILCOX, 2005). O purgador atua como um ponto de coleta desses condensados, permitindo sua drenagem periódica sem interromper o fluxo do gás. Dessa forma, assegura-se que o syngas seja encaminhado à etapa de conversão energética com menor teor de umidade e livre de líquidos acumulados, aumentando a confiabilidade e a segurança operacional do sistema.

Figura 2.14 – Purgador.



2.7 Sistema de Conversão Energética - Geração de Vapor e Produção de Energia

A conversão energética do syngas pode ser realizada por diferentes tecnologias, incluindo motores de combustão interna, turbinas a gás, células a combustível e sistemas baseados em ciclos a vapor. A escolha da tecnologia depende da composição do gás, do porte da planta e da aplicação desejada. Em sistemas de médio e grande porte, a utilização do syngas em caldeiras para geração de vapor apresenta elevada robustez operacional e maior tolerância às variações na composição do combustível, sendo amplamente empregada em plantas industriais (HIGMAN; VAN DER BURGT, 2008; ÇENGEL; BOLES, 2015). Na planta em estudo foi utilizado o modelo com base em plantas industriais, mas vale ressaltar que a real finalidade é didática.

Após o tratamento e condicionamento, o gás de síntese é encaminhado ao sistema de conversão energética, responsável por transformar a energia química armazenada no combustível em energia útil. No presente projeto, o aproveitamento energético está associado à utilização de uma caldeira para produção de vapor, o qual é posteriormente

expandido em uma turbina acoplada a um gerador elétrico. A caldeira promove a transferência da energia térmica, a partir da combustão do gás de síntese, para a água de alimentação, gerando vapor sob pressão e temperatura adequadas para o acionamento da turbina. Durante a expansão do vapor ocorre a conversão da energia térmica em energia mecânica de rotação, que é então transformada em energia elétrica pelo gerador. Esse conjunto de equipamentos permite o aproveitamento eficiente da energia contida no syngas, contribuindo para a viabilidade técnica e energética da planta de gaseificação.

Embora a planta tenha sido concebida para futura geração de energia elétrica por meio de caldeira e turbina, esta etapa não faz parte do escopo deste trabalho, sendo apresentada apenas para contextualização da aplicação do syngas.

3. Metodologia

3.1 Caracterização da pesquisa

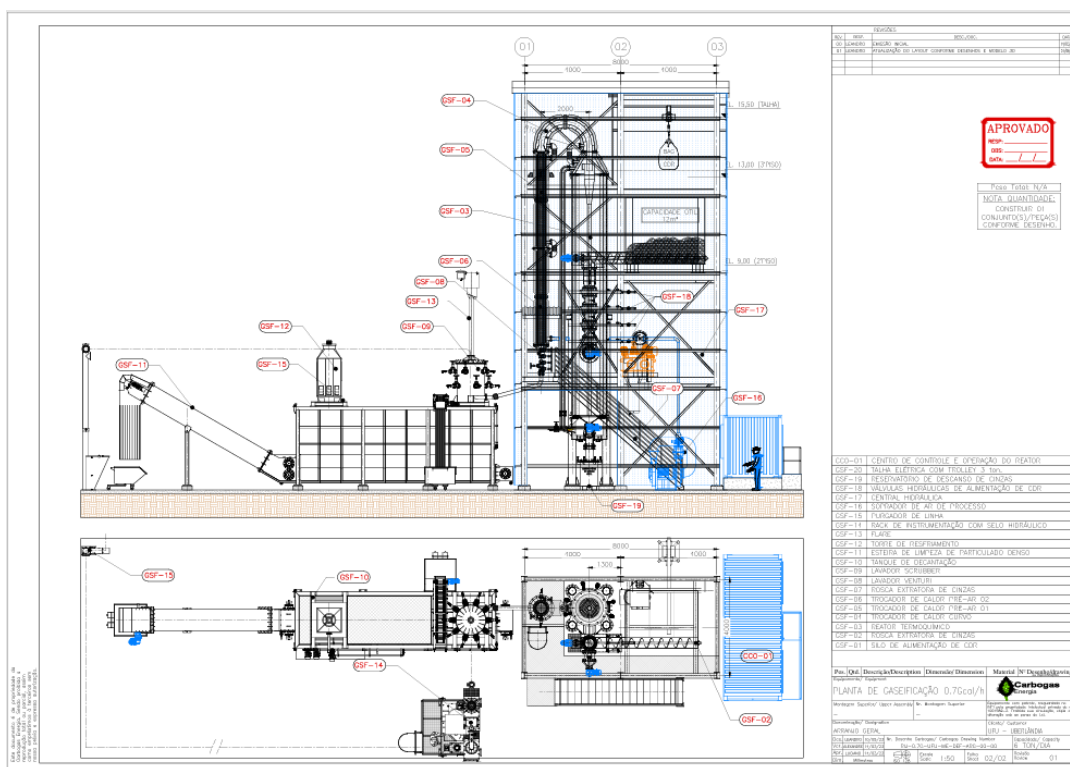
O presente trabalho de conclusão de curso caracteriza-se como aplicado, de natureza experimental e abordagem predominantemente quantitativa, uma vez que envolve a implantação de uma planta piloto de gaseificação, a realização de testes operacionais e a análise do desempenho dos equipamentos e do gás de síntese produzido. Quanto aos objetivos, o trabalho enquadra-se como uma pesquisa descritiva e exploratória, pois busca documentar detalhadamente as etapas de montagem da planta, avaliar seu funcionamento e discutir os resultados obtidos durante os ensaios experimentais. O seu desenvolvimento foi conduzido por meio de um estudo de caso realizado em uma planta piloto de gaseificação instalada no Laboratório de Transferência de Calor e Massa da Universidade Federal de Uberlândia (UFU), permitindo acompanhar todas as etapas de implantação, desde a montagem dos equipamentos até a realização dos testes operacionais.

A abordagem metodológica é predominantemente qualitativa, uma vez que se baseia na observação direta das atividades de implantação, na análise técnica dos procedimentos executados e na interpretação dos resultados obtidos durante o comissionamento da planta. Entretanto, também incorpora elementos quantitativos por meio da análise de parâmetros operacionais, especificações técnicas dos equipamentos e resultados dos ensaios realizados durante os testes operacionais à frio. Dessa forma, a metodologia adotada permitiu documentar todas as etapas da implantação da planta de gaseificação, desde a instalação dos equipamentos até a realização dos testes operacionais iniciais, fornecendo uma visão abrangente do processo de montagem e das soluções técnicas implementadas.

O desenvolvimento de uma planta de gaseificação para produção de gás de síntese envolve uma sequência de etapas de engenharia destinadas a garantir a eficiência e a confiabilidade operacional do sistema. Inicialmente, realiza-se a definição da capacidade de processamento da matéria-prima e das condições de operação do gaseificador. Em

3.2 Caracterização e descrição da planta

Figura 3.1 – Arranjo Geral da Planta.



A planta piloto de gaseificação foi composta por um conjunto de equipamentos projetados para realizar as etapas de alimentação do combustível, conversão termoquímica, limpeza e condicionamento do gás de síntese, além da conversão da

energia térmica em energia elétrica. Os equipamentos foram dimensionados e integrados de forma a possibilitar a operação contínua da planta, garantindo estabilidade operacional e segurança durante os ensaios experimentais.

O sistema de alimentação foi projetado para promover o fornecimento contínuo e controlado do Combustível Derivado de Resíduos (CDR) ao reator de gaseificação. O conjunto é constituído por um silo de armazenamento, responsável por manter o combustível disponível durante a operação, e por uma rosca transportadora, que realiza o transporte do material até a entrada do gaseificador. O acionamento da rosca é realizado por um moto redutor elétrico, permitindo controlar a vazão de alimentação conforme a demanda do processo. Esse sistema garante a alimentação uniforme do reator, reduzindo oscilações na produção de gás de síntese e contribuindo para a estabilidade das condições operacionais. Na sequência, o CDR é depositado sobre as válvulas alimentadoras, tais válvulas são do tipo guilhotina com acionamento hidráulico e possuem abertura e fechamento controlado, de forma que impeçam o retorno do gás presente no reator, pela sua abertura de duas a duas, estando a primeira e a terceira abertas, a segunda e a quarta estarão fechadas, posteriormente, ocorre a inversão da configuração operacional, com o fechamento das válvulas inicialmente abertas e a abertura das que estavam fechadas.

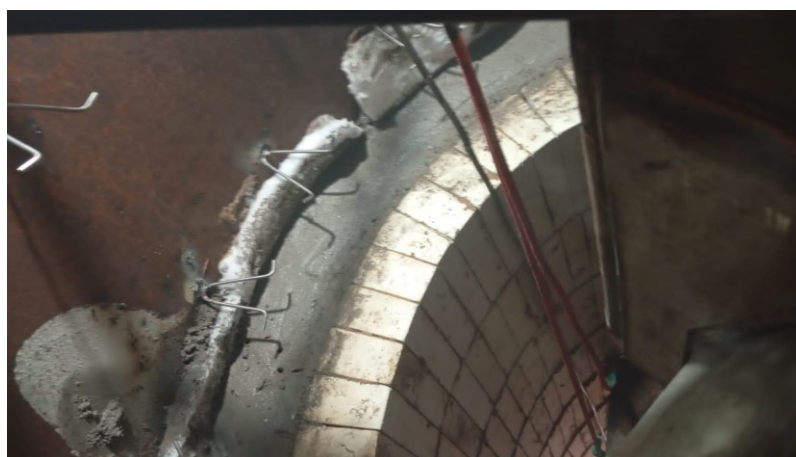
Figura 3.2 – Válvulas alimentadoras em 2025.



O principal equipamento da planta é o reator de gaseificação de leito fluidizado e circulante, responsável pela conversão termoquímica do CDR em gás de síntese. O reator de gaseificação foi projetado com um sistema de revestimento multicamadas, cuja finalidade é garantir a resistência mecânica da estrutura, minimizar as perdas térmicas e

proteger a estrutura metálica contra as elevadas temperaturas do processo. Da região externa para a interna, o reator é constituído por uma carcaça em aço ASTM A56, responsável pela sustentação estrutural do equipamento, seguido por uma camada de manta de silicato, que atua como isolante térmico, reduzindo a transferência de calor para o ambiente e protegendo a estrutura metálica. Internamente à manta encontra-se o concreto refratário, empregado para aumentar a resistência térmica e mecânica do conjunto, absorvendo tensões decorrentes da dilatação térmica e proporcionando suporte ao revestimento refratário. A camada mais interna é composta por tijolos refratários, diretamente expostos às condições severas de operação do reator. Na região inferior, correspondente à zona de gaseificação, onde ocorrem as maiores temperaturas foram utilizados tijolos refratários de alta alumina (coloração branca), selecionados por sua elevada resistência às altas temperaturas, ao desgaste abrasivo e aos ataques químicos. Na região superior do reator, onde as temperaturas são relativamente menores, foram empregados tijolos refratários de baixa alumina (coloração vermelha), proporcionando adequada resistência térmica com menor custo de implantação. Essa configuração otimiza o desempenho térmico do reator, aumenta sua vida útil e reduz a necessidade de intervenções de manutenção.

Figura 3.3 – Revestimento do reator feito em 2025.



Em sua região inferior encontra-se a grelha distribuidora de ar, que foi confeccionada em aço inoxidável 310H, liga metálica indicada para aplicações em altas temperaturas devido à sua elevada resistência à fluência, à oxidação e aos ciclos térmicos. Sua geometria é composta por perfurações dimensionadas para promover a distribuição uniforme do ar de fluidização sobre toda a seção transversal do reator, condição

indispensável para a formação e manutenção do leito fluidizado circulante. Além disso, seu projeto geométrico possibilita o escoamento contínuo das cinzas geradas durante o processo, direcionando-as ao sistema de extração sem comprometer a distribuição do agente gaseificante nem a estabilidade operacional do reator. O sistema de insuflação de ar é realizado por sopradores controlados por inversores de frequência, permitindo o ajuste da vazão de ar conforme as condições operacionais desejadas.

Figura 3.4 – Sopradores.



Após deixar o reator, o gás de síntese percorre um conjunto de equipamentos destinados à remoção de partículas sólidas, condensáveis e contaminantes. Inicialmente, o gás atravessa um ciclone de alta eficiência, responsável pela separação das partículas mais grosseiras por ação da força centrífuga. Na sequência, o gás passa por um trocador de calor, sendo esse um conjunto de um trocador curvo e um trocador reto, cuja função é promover o aproveitamento da energia térmica do gás para pré-aquecimento do ar de processo, contribuindo para o aumento da eficiência energética da planta. Posteriormente, o gás é conduzido ao lavador venturi, onde ocorre a remoção das partículas finas por meio do contato intenso entre o fluxo gasoso e a água pulverizada em alta velocidade. Em seguida, o gás passa pelo lavador scrubber, responsável pelo refino final do processo de limpeza, promovendo a remoção das partículas remanescentes, o resfriamento do gás e a separação dos condensados formados durante o processo.

A água utilizada nos lavadores é encaminhada ao tanque de decantação, onde ocorre a separação gravitacional das partículas sedimentáveis e dos materiais flutuantes. Nesse reservatório, é realizada a dosagem controlada de hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2), com o objetivo de elevar e estabilizar o pH da água de processo, favorecendo a precipitação de compostos dissolvidos e aumentando a eficiência da sedimentação do material particulado. Além de melhorar o processo de decantação, o tratamento químico contribui para minimizar a corrosão das tubulações e equipamentos do circuito hidráulico, preservando suas condições de operação. O tanque é equipado com um raspador superficial para remoção de materiais de baixa densidade e com um raspador de particulado denso (Redler), acionado por sistema de correntes, responsável pela remoção contínua dos sedimentos depositados no fundo do reservatório. Após a decantação e o condicionamento químico, a água segue para a torre de resfriamento, onde sua temperatura é reduzida antes de retornar aos lavadores, permitindo a operação em circuito fechado e reduzindo significativamente o consumo de água da planta. Com a utilização da torre de resfriamento, a reposição de água restringe-se, em condições normais de operação, praticamente às perdas por evaporação para o ambiente, uma vez que o tanque de decantação permanece aberto à atmosfera.

Figura 3.5 – Vista superior do Tanque de Decantação.



Antes da utilização do gás na etapa de conversão energética, o sistema dispõe ainda de um purgador de linha, destinado à remoção dos condensados eventualmente

presentes no fluxo gasoso, assegurando que apenas o gás de síntese seja encaminhado à caldeira. Após o processo de limpeza e condicionamento, o gás de síntese é direcionado à caldeira, onde é queimado para geração de energia térmica. O calor liberado pela combustão é transferido para a água de alimentação, produzindo vapor sob pressão adequada para acionamento da turbina a vapor. O conjunto de geração é composto por uma caldeira, uma turbina a vapor e um gerador elétrico acoplado ao eixo da turbina. Durante a expansão do vapor ocorre a conversão da energia térmica em energia mecânica, posteriormente transformada em energia elétrica pelo gerador. Essa configuração possibilita o aproveitamento da energia contida no syngas produzido na planta, demonstrando a viabilidade da gaseificação como alternativa para geração de energia a partir do Combustível Derivado de Resíduos (CDR).

A planta conta ainda com diversos sistemas auxiliares indispensáveis ao seu funcionamento. Entre eles destacam-se a central hidráulica, responsável pelo fornecimento de potência hidráulica aos equipamentos (válvulas guilhotinas) que utilizam esse tipo de acionamento. Para assegurar a operação contínua e evitar o superaquecimento do óleo hidráulico, o sistema é equipado com um radiador, responsável pela dissipação do calor gerado durante o funcionamento da unidade hidráulica, preservando as propriedades do fluido e aumentando a vida útil dos componentes. Outro equipamento de grande importância é o ventilador da torre de resfriamento, responsável por promover a circulação forçada do ar através do enchimento da torre, intensificando as trocas de calor e massa entre a água aquecida proveniente do sistema de lavagem do gás e o ar atmosférico. A operação adequada desse ventilador garante maior eficiência no resfriamento da água de recirculação, permitindo sua reutilização no processo e reduzindo o consumo hídrico da planta.

Figura 3.6 – Central Hidráulica.



Os sopradores de ar constituem outro sistema fundamental, sendo responsáveis pelo fornecimento do agente gaseificante ao reator de leito fluidizado. O controle da vazão de ar é realizado por meio de inversores de frequência, possibilitando o ajuste da velocidade de rotação dos motores e, conseqüentemente, da quantidade de ar insuflada no reator, permitindo manter as condições ideais para a fluidização do leito e para as reações de gaseificação.

A planta também dispõe de uma válvula reguladora de pressão, cuja função é controlar a pressão do sistema, o emprego dessa válvula contribui para a estabilidade do processo. Complementando o sistema de controle, tem-se uma válvula reguladora de vazão, responsável por ajustar a quantidade gás que será entregue para a caldeira. Sendo ambas as válvulas autoatuadas, cujo princípio de funcionamento baseia-se em uma campana de nível, instalada no interior do reservatório e posicionada de forma a acompanhar as variações do nível da água. A movimentação vertical da campana é transmitida por um conjunto de hastes e alavancas conectado a um sistema de contrapesos, responsável por equilibrar as forças atuantes e modular o movimento de uma válvula borboleta instalada na tubulação. À medida que o nível da água se altera, a posição da campana também se modifica, provocando a abertura ou o fechamento gradual da válvula borboleta, de forma a regular automaticamente a vazão ou a pressão de linha. Além de contar com um ponteiro mostrador, indicando a posição da borboleta, permitindo a visualização do processo.

Figura 3.7 – a) Válvula Reguladora de Pressão e b) Válvula Reguladora de Vazão.



Durante as paradas programadas e intervenções de manutenção, o reator de gaseificação e o flare são submetidos a um processo de inertização utilizando dióxido de carbono (CO_2). Esse procedimento tem como objetivo deslocar o oxigênio e os gases combustíveis remanescentes do interior dos equipamentos, reduzindo significativamente o risco de formação de atmosferas inflamáveis ou explosivas. A introdução do CO_2 promove a diminuição da concentração de oxigênio para níveis seguros, impedindo a ocorrência de combustão espontânea dos materiais ainda presentes no reator e aumentando a segurança das atividades de inspeção, manutenção e partida subsequente da planta.

O processo de inertização é realizado após a interrupção da alimentação de combustível e a estabilização das condições operacionais do reator. O dióxido de carbono é introduzido de forma controlada até que a atmosfera interna atinja as condições estabelecidas para a parada segura do equipamento. A utilização do CO_2 como gás inerte apresenta como vantagens sua disponibilidade comercial, baixo custo, facilidade de armazenamento e elevada eficiência na redução da concentração de oxigênio, sendo amplamente empregada em instalações industriais que operam com gases combustíveis e processos termoquímicos.

Por fim, a planta é equipada com um conjunto de instrumentação e automação, composto por sensores de temperatura, pressão, nível e vazão, além de inversores de frequência e dispositivos de proteção elétrica, responsáveis pelo monitoramento contínuo das condições operacionais e pelo controle dos principais equipamentos. Esses sistemas permitem o acompanhamento em tempo real das variáveis de processo, aumentando a confiabilidade operacional, a segurança da instalação e a repetibilidade dos ensaios realizados.

Figura 3.8– Planta em estudo.



Para a planta de gaseificação em estudo, a primeira etapa para seu desenvolvimento levou em consideração um consumo de $500 \text{ Nm}^3/\text{h}$ de syngas na caldeira e a capacidade de geração de $0,7 \text{ Gcal/h}$. Vale ressaltar que tal planta possui todas as características de uma planta industrial, porém com aplicabilidade didática, estando vinculada ao Laboratório de Transferência de Massa e Calor no campus Glória da Universidade Federal de Uberlândia. Em relação ao reator, teremos o uso do leito fluidizado e circulante, com a presença de areia de sílica como elemento inerte e com o ar atmosférico sendo o agente gaseificante. Nesta aplicação, o CDR é composto por cigarros apreendidos pela Receita Federal. Assim, a caracterização apresentada neste capítulo fornece o embasamento técnico necessário para a descrição dos procedimentos metodológicos adotados no acompanhamento da implantação, apresentados na seção seguinte.

3.3 Procedimentos Metodológicos

O desenvolvimento deste trabalho foi realizado por meio do acompanhamento das atividades de implantação da planta piloto de gaseificação, contemplando as etapas de montagem mecânica, instalação hidráulica, montagem elétrica, instrumentação, integração dos sistemas e realização dos testes de comissionamento. Todas as atividades foram acompanhadas de forma contínua, permitindo o registro das intervenções executadas, das adequações realizadas e das soluções adotadas ao longo da implantação.

Inicialmente, foi realizada a caracterização dos principais equipamentos que compõem a planta, identificando suas funções no processo de gaseificação e suas especificações técnicas. Em seguida, procedeu-se ao acompanhamento das etapas de instalação dos equipamentos, observando o posicionamento dos componentes, a montagem das estruturas de suporte, as interligações das tubulações de processo e a instalação dos sistemas auxiliares necessários ao funcionamento da unidade.

Na sequência, foram acompanhadas as interligações hidráulicas responsáveis pela circulação da água de lavagem, as conexões das linhas de transporte do gás de síntese e as instalações elétricas destinadas ao acionamento dos motores, bombas, sopradores, moto vibrador, raspadores, roscas transportadoras e demais equipamentos da planta. Também foram observadas as etapas de instalação da instrumentação, incluindo sensores de temperatura, pressão, nível e vazão, bem como os dispositivos de proteção e controle empregados durante a operação.

Após a conclusão da montagem, foram acompanhados os procedimentos de comissionamento da planta, iniciando-se pelos testes a frio. Nessa etapa, foram verificadas a estanqueidade do tanque de decantação, a integridade das tubulações, o correto sentido de rotação dos equipamentos motorizados, a regulagem dos inversores de frequência, o funcionamento dos sistemas hidráulicos e a operação dos dispositivos mecânicos de transporte e limpeza de particulados. As adequações identificadas durante esses ensaios foram registradas e posteriormente analisadas quanto à sua contribuição para o desempenho operacional da planta.

A coleta de dados foi realizada por meio de observações diretas, registros fotográficos, consulta aos documentos técnicos do projeto, especificações dos fabricantes

e acompanhamento das atividades executadas pela equipe responsável pela implantação. As informações obtidas serviram de base para a descrição das etapas de montagem e para a análise crítica dos resultados apresentados no capítulo seguinte.

4. Resultados e Discussão

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos durante a implantação da planta de gaseificação, abrangendo as etapas de montagem, integração dos sistemas, comissionamento e testes iniciais de operação. Os resultados são analisados à luz dos objetivos propostos neste trabalho e comparados, sempre que pertinente, com os fundamentos teóricos apresentados na revisão bibliográfica, buscando evidenciar a contribuição de cada etapa para o desempenho global da planta.

Inicialmente, são descritas as atividades de montagem e interligação dos equipamentos que compõem o processo de gaseificação, destacando-se as adequações realizadas durante a instalação e os desafios encontrados na integração dos sistemas mecânicos, hidráulicos, elétricos e de instrumentação. Em seguida, são apresentados os resultados dos testes a frio, cuja finalidade foi verificar o correto funcionamento dos equipamentos, a estanqueidade dos sistemas, o sentido de rotação dos conjuntos motrizes, a regulação dos dispositivos de controle e a confiabilidade operacional da planta antes da realização dos ensaios térmicos.

A análise dos resultados permitiu avaliar a eficiência das soluções adotadas durante a implantação, bem como identificar melhorias implementadas para garantir a operação segura e contínua da unidade. Dessa forma, este capítulo demonstra como as intervenções realizadas ao longo do processo de montagem contribuíram para o atendimento dos requisitos de projeto e para a preparação da planta para as etapas subsequentes de operação e geração de energia.

4.1 Montagem da planta

De maneira geral, a implantação de uma planta de gaseificação envolve as seguintes etapas: terraplenagem, fundação, construção do galpão, estrutura metálica do prédio de gaseificação, instalação dos equipamentos, montagem das tubulações, instalação da instrumentação, montagem da estrutura elétrica e implementação da automação. Seguindo a sequência geral, inicialmente foi levado em consideração o espaço disponível para implementação da planta e posterior às adequações necessárias de

preparação do terreno, foi estabelecido a construção civil do galpão e das bases de suporte dos equipamentos. Junto à parte de construção civil executou-se a malha de aterramento da parte elétrica da planta.

A montagem mecânica instaurou-se com o posicionamento dos equipamentos de grande porte sobre as respectivas bases. Nessa etapa o reator termoquímico e seus apoios foram alocados, além do container destinado a ser o centro de controle e operação do reator, o tanque de lavagem dos gases e o rack de instrumentação. À medida que a implantação avançava, os demais equipamentos foram sendo posicionados e fixados conforme o cronograma executivo e a sequência construtiva estabelecida para o projeto.

A segunda etapa da montagem contemplou a execução da estrutura metálica do prédio de gaseificação, compreendendo a instalação das vigas estruturais e dos pisos operacionais da unidade. Inicialmente, foram realizadas as atividades de posicionamento, alinhamento e nivelamento das vigas, garantindo o correto enquadramento geométrico da estrutura e o atendimento às especificações de projeto. Após a fixação dos elementos estruturais, procedeu-se à montagem e soldagem das chapas metálicas que compõem os pisos de operação e manutenção da planta.

A estrutura foi concebida em três níveis principais, distribuídos em diferentes elevações para acomodação dos equipamentos, tubulações, instrumentos e acessos operacionais. O primeiro piso foi instalado na cota de 4.700 mm, o segundo na cota de 9.000 mm e o terceiro na cota de 12.500 mm em relação ao nível de referência da planta, sendo esse o nível do solo da área de implantação da planta. Esses níveis foram projetados para permitir a adequada distribuição dos equipamentos do processo de gaseificação, além de proporcionar condições seguras para inspeção, operação e manutenção.

Figura 4.1 – Conclusão da estrutura do prédio de gaseificação.



Complementando a estrutura principal, foi instalada uma viga de rolamento destinada à sustentação da talha elétrica, posicionada na elevação de 16.000 mm. Em sequência, foi executada a estrutura de cobertura do prédio, na cota de 16.475 mm. Após a montagem da cobertura do prédio, foram instaladas as terças metálicas, fixadas por meio de parafusos às vigas estruturais. A seguir, foram montadas as cantoneiras de contraventamento e os tirantes, responsáveis por aumentar a rigidez e a estabilidade global da estrutura. Com a conclusão dessa etapa, a estrutura encontrava-se apta para receber os elementos de fechamento e cobertura da edificação.

Para a conclusão do prédio de gaseificação foi necessário posicionar os equipamentos de grande porte no interior da estrutura para posterior instalação e fixação das telhas de cobertura e fechamento lateral do prédio. A realização dessa etapa após a montagem dos equipamentos permitiu maior facilidade nas operações de içamento e movimentação de cargas, evitando interferências estruturais durante a instalação dos componentes principais da planta. As telhas foram fixadas às terças metálicas por meio de elementos de fixação apropriados, proporcionando o fechamento da edificação e a proteção dos equipamentos e das áreas operacionais contra a ação das intempéries. Ressalta-se que, conforme previsto em projeto, alguns pontos estratégicos do térreo permaneceram sem fechamento lateral, devido à necessidade de circulação e de visibilidade para operação. Com a conclusão da estrutura civil e do fechamento do prédio

de gaseificação, as atividades de montagem passaram a concentrar-se na instalação e interligação dos equipamentos de processo.

Figura 4.2 – Fechamento do prédio de gaseificação em 2026.



Após a conclusão da estrutura principal, foi possível realizar a instalação do revestimento interno do reator, constituído pela manta de silicato, concreto refratário e tijolos refratários. Finalizada essa etapa, foi instalado o ciclone localizado em seu interior, responsável pela separação do material particulado arrastado pelo gás de síntese durante a gaseificação. Na sequência, realizou-se a montagem do sistema de recuperação térmica, composto por um trocador de calor curvo, que interliga o ciclone interno ao trocador de calor reto, possibilitando o transporte do gás ainda em elevada temperatura e o aproveitamento de sua energia térmica para aumento da eficiência do processo.

Concluída essa etapa, foram executadas as interligações por meio das tubulações de processo, conectando os trocadores de calor às unidades de limpeza do gás, constituídas pelos lavadores venturi e scrubber. Após o posicionamento desses equipamentos, procedeu-se à instalação dos bicos pulverizadores, componentes responsáveis pela atomização da água de lavagem no interior dos lavadores. Os bicos foram montados de forma a garantir o correto direcionamento dos jatos e a distribuição

uniforme da água ao longo da seção de escoamento do gás, promovendo maior contato entre as fases líquida e gasosa e, conseqüentemente, elevando a eficiência da remoção de material particulado, alcatrões e demais impurezas presentes no gás de síntese.

Na sequência, foram instaladas as bombas de circulação de água, responsáveis por promover a recirculação da água de processo entre o tanque de decantação, a torre de resfriamento e os lavadores de gases. Paralelamente, foram executadas as tubulações de alimentação e retorno de água, bem como a instalação dos acessórios hidráulicos, incluindo flanges, válvulas, suportes e elementos de vedação, garantindo a estanqueidade e a continuidade do circuito hidráulico da planta. Concluídas essas interligações, prosseguiu-se com a instalação dos sistemas auxiliares, compreendendo o tanque de decantação, a torre de resfriamento, as válvulas de controle e os demais equipamentos responsáveis pelo condicionamento da água de processo e pelo suporte à operação contínua da unidade de gaseificação. Ao término dessa etapa, o circuito hidráulico encontrava-se completamente integrado, estabelecendo um sistema fechado de recirculação da água de lavagem entre os lavadores, o tanque de decantação e a torre de resfriamento, condição indispensável para garantir a eficiência da limpeza do gás de síntese e a redução do consumo de água da planta.

Figura 4.3 – Bombas de água.



Nessa etapa também foram instaladas as válvulas reguladoras de pressão e de vazão, dispositivos fundamentais para o controle automático do processo. Ambas utilizam

um mecanismo auto atuado constituído por uma campana sensível às variações do nível da água, associada a um sistema de hastes, alavancas e contrapesos que controla gradualmente a abertura de uma válvula borboleta, proporcionando estabilidade hidráulica ao sistema.

Em paralelo, a montagem das tubulações de processo teve início pelas linhas responsáveis pelo transporte do gás de síntese, interligando o reator de leito fluidizado circulante ao ciclone de alta eficiência, ao trocador de calor, aos lavadores venturi e scrubber e ao purgador de linha. Durante essa etapa foram instaladas conexões flangeadas, curvas, reduções, suportes estruturais, juntas de expansão e elementos de fixação necessários para absorver dilatações térmicas e facilitar futuras atividades de inspeção e manutenção. Após a montagem, realizou-se a conferência do alinhamento das tubulações, da posição dos suportes e da integridade das uniões mecânicas.

Na sequência, procedeu-se à instalação das linhas de alimentação de ar destinadas aos sopradores e ao reator de gaseificação. Foram montadas as tubulações de insuflação, conexões, registros e suportes, assegurando o fornecimento uniforme do agente gaseificante ao leito fluidizado. Paralelamente, foram instaladas as linhas de CO₂, utilizadas para a inertização do reator durante as paradas operacionais e atividades de manutenção, proporcionando uma atmosfera segura no interior do equipamento e reduzindo os riscos associados à presença de gases combustíveis. Em conjunto, foram executadas as tubulações de GLP (Gás Liquefeito de Petróleo), destinadas à alimentação do queimador piloto da planta e do queimador do flare, responsáveis pela ignição inicial do sistema e pela manutenção da chama piloto, garantindo condições seguras para a partida e a operação dos equipamentos. Todas as linhas de processo foram montadas com seus respectivos acessórios, incluindo válvulas, conexões e elementos de vedação, assegurando a integridade e a confiabilidade dos sistemas de distribuição dos gases.

Paralelamente, foram executadas as conexões da central hidráulica, incluindo as tubulações de óleo responsáveis pelo acionamento das válvulas hidráulicas, bem como a instalação do radiador destinado ao controle da temperatura do fluido hidráulico durante a operação.

Concluídas as instalações mecânicas e hidráulicas, teve início a montagem dos sistemas elétricos e de instrumentação. Nessa fase foi realizada a implantação da infraestrutura elétrica da planta, etapa responsável por garantir o fornecimento de energia aos equipamentos e a comunicação entre os instrumentos de campo e o sistema de controle. A infraestrutura foi executada predominantemente com a utilização de eletrocalhas metálicas, dimensionadas para suportar os cabos de potência e de sinal, proporcionando organização, proteção mecânica e facilidade de acesso para futuras inspeções e manutenções. Em seguida, foram realizados o lançamento e a identificação dos cabos, respeitando-se a separação entre circuitos de potência e de instrumentação, de modo a minimizar interferências eletromagnéticas e assegurar a confiabilidade dos sinais transmitidos.

Figura 4.4 – Infraestrutura elétrica.

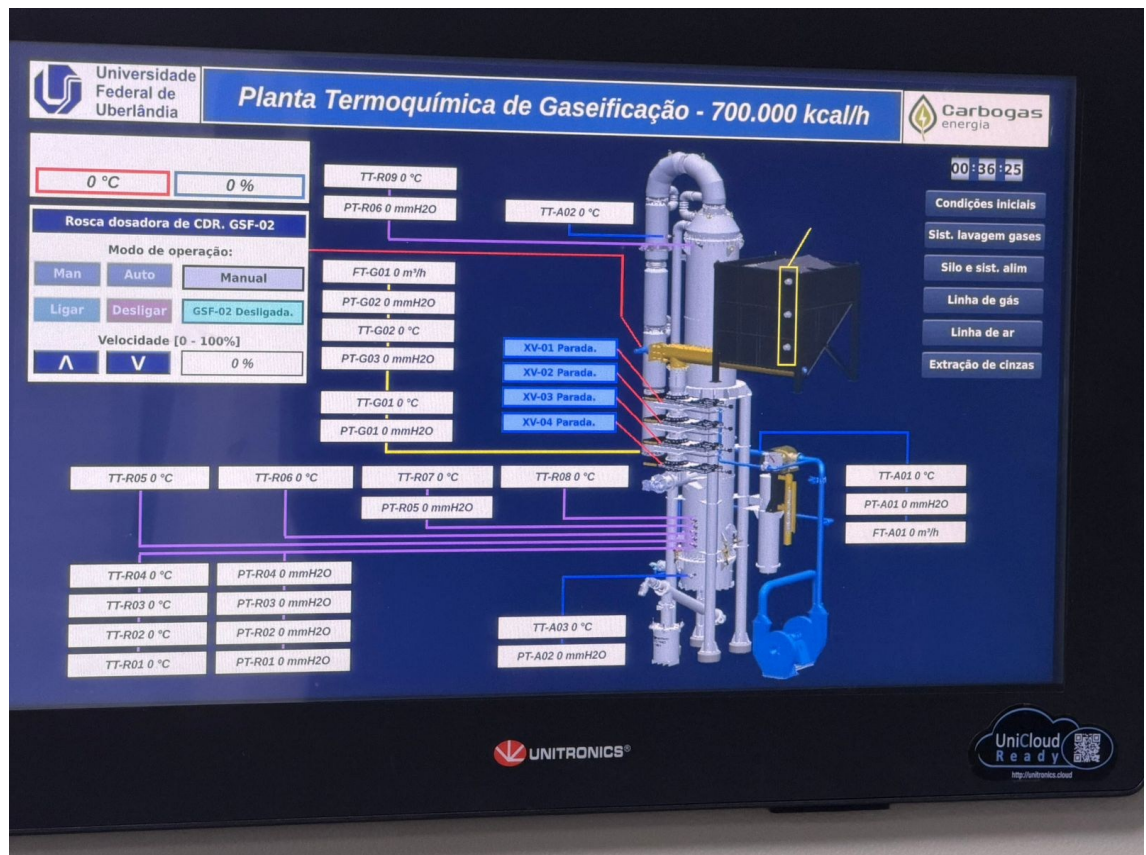


Concluído o lançamento dos cabos, foram realizados os ensaios elétricos de isolamento, utilizando um megômetro, e os testes de continuidade dos circuitos, com o objetivo de verificar a integridade dos condutores, identificar possíveis falhas de

isolamento e confirmar a correta correspondência entre os pontos de origem e destino de cada cabo. Após a aprovação desses ensaios, procedeu-se à conectorização dos cabos nas caixas de junção, nos motores, sensores, válvulas e demais instrumentos de campo, bem como à interligação dos circuitos aos painéis elétricos instalados na sala de controle e comando. Essa etapa possibilitou a integração entre os equipamentos de processo, os dispositivos de proteção, os sistemas de acionamento e a instrumentação, estabelecendo as condições necessárias para a realização dos testes funcionais e para a futura operação automatizada da planta de gaseificação.

Paralelamente à conclusão das instalações elétricas e da instrumentação, foi desenvolvido e configurado o sistema supervisório na Interface Homem-Máquina (IHM), responsável pelo monitoramento e comando da planta de gaseificação. Nessa etapa, foram desenvolvidas e configuradas as telas de operação, estabelecida a comunicação com o Controlador Lógico Programável (CLP) e definidos os alarmes, as variáveis de processo e os comandos destinados ao acionamento dos equipamentos. A integração entre a IHM e o CLP possibilitou a aquisição e o processamento em tempo real dos sinais provenientes dos instrumentos de campo, como sensores de temperatura, pressão, nível e vazão, além do monitoramento do estado operacional de motores, válvulas e demais dispositivos automatizados, permitindo o acompanhamento contínuo das condições de operação da planta.

Figura 4.5 – Tela principal IHM.



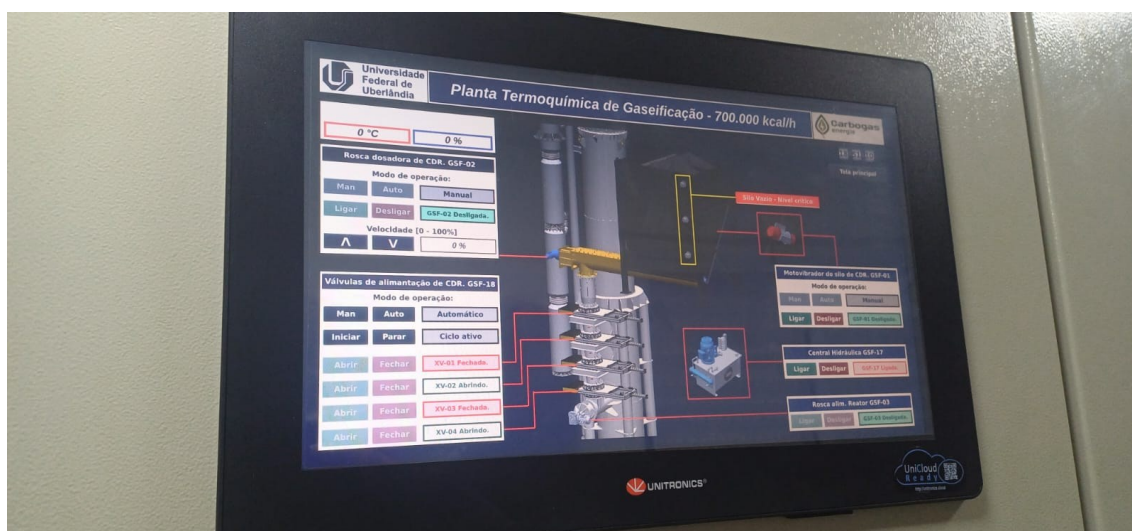
Concluída a implementação do software supervisório, foram realizados testes de comunicação entre a IHM, o CLP e os equipamentos de campo, com o objetivo de validar a transmissão e o processamento dos sinais digitais e analógicos, a atualização das variáveis em tempo real e o funcionamento dos comandos de partida, parada e supervisão dos equipamentos. Também foram verificados os sistemas de alarme, os indicadores de status, as telas de operação e os intertravamentos implementados para garantir a segurança operacional. Os resultados demonstraram comunicação estável entre os dispositivos e desempenho satisfatório do sistema supervisório, que passou a fornecer uma interface confiável para a operação, o monitoramento contínuo do processo e o suporte às etapas subsequentes de comissionamento.

Após a validação da comunicação entre os dispositivos de campo e o sistema de automação, iniciou-se a etapa de parametrização da planta, fundamental para adequar a lógica de controle às condições previstas em projeto. Essa atividade compreendeu a configuração das variáveis de processo, dos tempos de operação, dos limites de atuação

dos equipamentos, dos intertravamentos de segurança e dos parâmetros de controle implementados no CLP e na IHM. Além disso, foram definidos os endereçamentos dos sinais digitais e analógicos, as escalas de leitura dos instrumentos, os modos de operação dos equipamentos e as condições necessárias para a habilitação de cada etapa do processo.

Durante a parametrização, foram ajustados os tempos de acionamento dos equipamentos de operação intermitente, como o motovibrador do silo de alimentação, bem como as sequências automáticas de partida e parada dos motores, das válvulas hidráulicas e dos demais atuadores da planta. Também foram estabelecidos os valores de referência (*setpoints*) das principais variáveis de processo, os limites para emissão de alarmes e os critérios de atuação dos intertravamentos de segurança, assegurando que a operação ocorresse de forma compatível com os requisitos operacionais e de segurança definidos em projeto. Ao término dessa etapa, foram executados testes funcionais para validar a lógica de controle implementada, confirmando a correta execução dos comandos enviados pela IHM, a resposta dos equipamentos às solicitações do operador e a confiabilidade do sistema de automação antes do início das atividades de comissionamento.

Figura 4.6 – Parametrização das válvulas de alimentação.



Com a finalização da parametrização e a validação funcional do sistema supervisor, a planta passou a dispor de todos os recursos necessários para o monitoramento, controle e operação integrada dos equipamentos, tornando-a apta ao

início das atividades de comissionamento e dos testes operacionais a frio. Antes da execução desses testes, foi realizada uma inspeção geral em todos os sistemas, contemplando a verificação do alinhamento dos equipamentos, do aperto das conexões flangeadas, da continuidade elétrica, da identificação das tubulações, da integridade das soldas e da correta instalação dos instrumentos de medição e controle. Essa inspeção constituiu uma etapa essencial do comissionamento da planta, permitindo identificar e corrigir eventuais não conformidades, além de assegurar que todos os subsistemas estivessem devidamente integrados e em conformidade com as especificações de projeto, proporcionando as condições necessárias para a realização segura e confiável dos testes a frio.

Testes à frio

Concluída a montagem da planta de gaseificação e a integração dos sistemas mecânicos, hidráulicos e elétricos, foi iniciada a etapa de testes a frio. Esses ensaios tiveram como objetivo verificar o funcionamento individual e integrado dos equipamentos sem a presença de biomassa ou geração de gás de síntese, permitindo identificar eventuais falhas de montagem, problemas de estanqueidade, incompatibilidades elétricas e inadequações mecânicas antes da partida da planta em condições operacionais. A realização dessa etapa foi fundamental para garantir a segurança dos operadores, preservar a integridade dos equipamentos e reduzir a possibilidade de interrupções durante os futuros testes a quente.

Teste de estanqueidade do tanque de decantação

O primeiro teste realizado consistiu na verificação da estanqueidade do tanque de decantação e da tubulação de abastecimento de água utilizada no sistema de lavagem do gás. Inicialmente, foi efetuada a inspeção visual das tubulações, conexões flangeadas, uniões rosqueadas e válvulas, confirmando-se a correta montagem e ausência de vazamentos ao longo da linha hidráulica.

Durante o enchimento do tanque de decantação, foram identificados vazamentos nas tampas de inspeção laterais e superior, tornando necessária a realização de adequações construtivas. A primeira intervenção consistiu na substituição da vedação originalmente executada com gaxeta grafitada por uma vedação em borracha, buscando aumentar a conformidade entre as superfícies de contato. Entretanto, essa modificação mostrou-se insuficiente para garantir a vedação completa da tampa superior, sendo suficiente apenas para as tampas laterais.

Como segunda tentativa, foi realizado um reforço estrutural na tampa superior com o objetivo de aumentar sua rigidez e proporcionar maior pressão de contato sobre o elemento de vedação. Apesar da melhoria obtida, ainda foram observados vazamentos na região dos parafusos de fixação, indicando que as deformações localizadas comprometiam a estanqueidade do conjunto. Diante dos resultados obtidos, optou-se pela fabricação de uma nova tampa metálica, soldada permanentemente ao tanque e

eliminando completamente os pontos potenciais de vazamento associados aos elementos de fixação. Após essa modificação, um novo teste hidráulico foi realizado, confirmando a completa estanqueidade do reservatório e sua aptidão para operação em regime contínuo.

Figura 4.7 – Tampa superior soldada.



Testes do sistema hidráulico

Após a validação do tanque de decantação, foram realizados os testes de funcionamento das bombas responsáveis pela recirculação da água utilizada nos lavadores venturi e scrubber. Inicialmente foi verificada a correta ligação elétrica dos motores, assegurando o sentido adequado de rotação conforme especificado pelo fabricante. Em seguida, avaliou-se a vazão fornecida por cada conjunto motobomba, verificando sua compatibilidade com a demanda hidráulica de cada bico pulverizador. Os ensaios confirmaram o funcionamento adequado das bombas, não sendo necessária qualquer intervenção corretiva além dos ajustes normais de operação.

Figura 4.8 – Bico pulverizador em funcionamento.



Testes dos motores elétricos

Na sequência, foram realizados os testes individuais dos motores elétricos pertencentes aos sistemas auxiliares da planta. O motor da torre de resfriamento e o motor responsável pelo acionamento do ventilador foram energizados para verificação do sentido de rotação, estabilidade operacional e compatibilidade da ligação elétrica com as especificações do projeto. Ambos apresentaram funcionamento satisfatório, sem ocorrência de vibrações anormais ou necessidade de correções.

O motor responsável pelo acionamento do motovibrador também foi submetido a ensaio operacional, sendo verificado o funcionamento mecânico e o comportamento durante a operação contínua. O equipamento apresentou desempenho compatível com as condições de projeto, dispensando ajustes adicionais.

Testes dos sistemas de transporte e remoção de resíduos

Os equipamentos destinados ao transporte de biomassa e remoção de resíduos também foram avaliados durante os testes a frio. O raspador de particulado denso (Redler) teve inicialmente seu sentido de rotação verificado, constatando-se a necessidade de reduzir sua velocidade de operação. Para isso, substituiu-se o sistema de acionamento

convencional por um inversor de frequência, permitindo o controle da velocidade de deslocamento das correntes transportadoras e proporcionando uma operação mais adequada ao processo de remoção contínua dos sedimentos acumulados no tanque de decantação.

O raspador superficial de partículas foi igualmente testado, sendo confirmada a correta direção de deslocamento e seu funcionamento dentro das condições previstas para remoção de materiais flutuantes. Ademais, foi necessário corrigir a altura de tal equipamento, realizando o ajuste nas porcas dos tirantes para que as placas raspadoras ficassem com o nível de água necessário para remover o particulado superficial.

Também foram verificados os sentidos de rotação da rosca alimentadora de Combustível Derivado de Resíduos (CDR) e da rosca extratora de cinzas. Esses ensaios garantiram que ambos os equipamentos transportassem os materiais no sentido previsto em projeto, assegurando alimentação contínua do reator e remoção eficiente das cinzas produzidas durante a gaseificação.

Testes da central hidráulica e do radiador

A central hidráulica foi submetida à inspeção elétrica e mecânica, verificando-se o correto sentido de rotação da bomba hidráulica e o funcionamento do conjunto responsável pelo acionamento dos equipamentos hidráulicos da planta. Da mesma forma, o radiador destinado ao resfriamento do óleo hidráulico teve seu ventilador ensaiado quanto ao sentido de rotação, assegurando o fluxo de ar adequado para dissipação térmica durante a operação. Com relação à tubulação que conduz o óleo foi necessário intervenções quanto a estanqueidade, com o reforço das soldas e aperto adequado das conexões a correta condição de operação foi obtida.

Figura 4.9 – Verificação da estanqueidade da tubulação.



Testes dos sopradores

Os sopradores responsáveis pelo fornecimento do agente gaseificante ao reator também passaram por testes operacionais. Durante os ensaios verificou-se que o sistema originalmente equipado com soft starters não permitia o controle preciso da vazão de ar exigido pelo processo de gaseificação. Dessa forma, optou-se pela substituição desses dispositivos por inversores de frequência, possibilitando o ajuste contínuo da velocidade de rotação dos sopradores, o controle da vazão de ar admitida no reator e uma maior flexibilidade operacional durante os futuros testes a quente. Após a substituição, foram novamente verificados os sentidos de rotação e o funcionamento dos sopradores, sendo confirmada sua operação conforme os requisitos estabelecidos no projeto.

Figura 4.10 – Painel dos inversores dos sopradores.



Com a realização do teste de ambos os sopradores com os inversores, foi verificada a necessidade de balancear os rotores, sendo realizado em campo o balanceamento dinâmico dos sopradores, cujo procedimento é destinado à correção de desequilíbrios de massa presentes nos conjuntos rotativos. Após o balanceamento, foram realizados novos ensaios de funcionamento, nos quais verificou-se que tal intervenção teve como finalidade reduzir os níveis de vibração, evitar esforços excessivos sobre os rolamentos e prolongar a vida útil dos componentes mecânicos, garantindo maior estabilidade durante a operação do sistema de insuflação de ar, atendendo às condições necessárias para a operação da planta.

Figura 4.11 – Balanceamento dos rotores.



Teste da talha elétrica

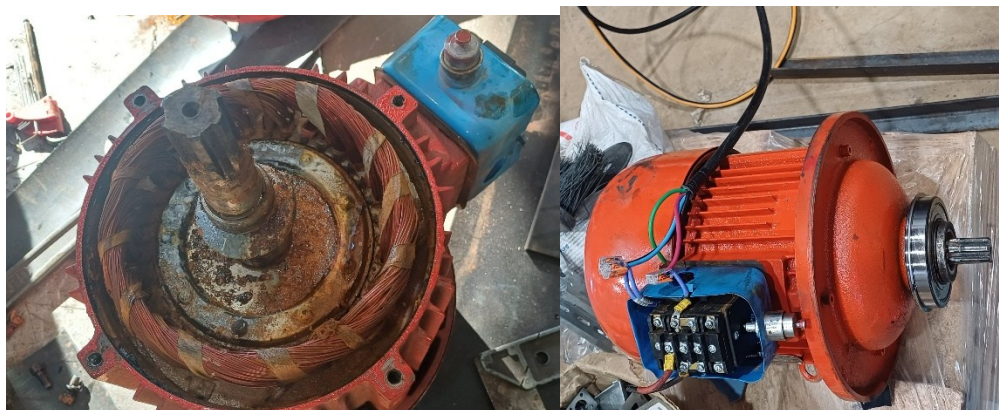
O teste de funcionamento da talha elétrica teve como objetivo verificar a operação do sistema de içamento destinado à movimentação dos bags de alimentação durante a operação. Inicialmente, observou-se que o motor permitia apenas o deslocamento da talha ao longo da viga de sustentação, não ocorrendo a movimentação vertical do gancho. Diante dessa inconsistência, foi realizada a desmontagem do conjunto motriz para inspeção interna, constatando-se que o motor apresentava elevado grau de oxidação em seus componentes internos, decorrente do período em que permaneceu armazenado e exposto às intempéries antes de sua instalação. Além disso, verificou-se uma indefinição nas informações fornecidas pelo fabricante quanto à tensão de alimentação do equipamento, dificultando sua correta ligação elétrica.

Figura 4.12 – Içamento de um bag.



Para restabelecer as condições de operação, foi realizado o rebobinamento completo do motor, procedendo-se também à adequação da ligação elétrica para alimentação em 380 V, conforme as características da instalação, além da limpeza e recuperação da carcaça e dos componentes mecânicos afetados pela corrosão. Após a reinstalação, foram executados novos testes de funcionamento, constatando-se o pleno acionamento dos movimentos de translação e elevação dos bags de CDR. Na sequência, realizaram-se os ajustes dos limitadores de fim de curso superior e inferior do cabo de aço, garantindo a operação segura do equipamento. Por fim, foram efetuados ensaios de simulação utilizando o içamento de um big bag, ocasião em que a talha apresentou desempenho satisfatório, atendendo plenamente aos requisitos operacionais previstos para a planta.

Figura 4.13 – a) Motor afetado pela corrosão. b) Motor rebobinado.



Teste geral de potência instalada.

Após a verificação individual de todos os equipamentos eletromecânicos, foi realizado o teste geral da potência instalada da planta, com o objetivo de avaliar o comportamento do sistema elétrico sob condição de operação simultânea dos principais consumidores de energia. Durante esse ensaio, foram acionados concomitantemente os motores dos sopradores, das bombas de recirculação de água, do conjunto motriz da torre de resfriamento e de seu ventilador, dos raspadores de particulado denso e de particulado flutuante, das roscas transportadoras de alimentação e de extração de cinzas.

A realização desse ensaio permitiu verificar a capacidade do sistema elétrico de alimentar simultaneamente todos os equipamentos sem ocorrência de sobrecargas, quedas significativas de tensão ou instabilidades operacionais. Os resultados obtidos demonstraram que a demanda elétrica da planta permaneceu compatível com a potência instalada prevista em projeto, validando o correto dimensionamento dos motores, dos dispositivos de proteção, dos condutores elétricos e dos sistemas de acionamento. Dessa forma, o teste confirmou a capacidade da infraestrutura elétrica em atender às condições de operação da planta de gaseificação, constituindo uma etapa essencial do comissionamento antes do início dos testes em condições térmicas.

Teste operacional do sistema de alimentação de CDR.

Com a conclusão dos testes individuais dos equipamentos, foi realizado o teste operacional do sistema de alimentação de Combustível Derivado de Resíduos (CDR),

com o objetivo de validar o funcionamento integrado de toda a linha de transporte do combustível sólido. O ensaio contemplou a avaliação de todas as etapas do processo, desde a alimentação dos *big bags* no silo de armazenamento até a extração do material pelo sistema de remoção de cinzas, simulando as condições operacionais previstas para a planta. Durante o teste, foram verificadas a continuidade do fluxo de material, a sincronização entre os equipamentos e a ausência de obstruções ou falhas que pudessem comprometer a alimentação contínua do reator.

Figura 4.14 – Alimentação do silo.



Foram avaliados o sistema de alimentação do silo, a rosca dosadora de CDR, as válvulas guilhotina responsáveis pelo isolamento e controle do fluxo, a rosca alimentadora do reator, o escoamento do combustível sobre a grelha e, por fim, a rosca extratora de cinzas. Observou-se que o CDR apresentou comportamento compatível com o previsto em projeto, distribuindo-se adequadamente sobre a grelha e permitindo sua condução uniforme no interior do reator. Da mesma forma, o sistema de extração de cinzas operou de maneira contínua, assegurando a remoção eficiente do material residual e evitando acúmulos que pudessem comprometer a operação. De modo geral, o desempenho do conjunto foi considerado satisfatório, evidenciando a integração entre os equipamentos e confirmando a confiabilidade operacional de um dos sistemas mais críticos da planta de gaseificação, condição indispensável para garantir alimentação estável do reator e a continuidade do processo de geração de gás de síntese.

Figura 4.15 – Rosca alimentadora em teste.



No processo de realização do teste do sistema de alimentação também foram realizados os testes operacionais das válvulas guilhotinas hidráulicas do sistema de alimentação de Combustível Derivado de Resíduos (CDR) e da linha do flare, bem como da válvula reguladora de ar do processo. Os ensaios tiveram como objetivo verificar o correto acionamento dos atuadores hidráulicos, a estanqueidade dos circuitos, os tempos de abertura e fechamento e a integração desses equipamentos com o sistema de automação da planta. De modo geral, o desempenho foi considerado satisfatório, sendo observado o funcionamento adequado de todas as válvulas durante os ciclos de operação. Durante os testes, foram identificados pequenos pontos de vazamento de óleo em algumas conexões hidráulicas, os quais foram prontamente corrigidos por meio do reaperto das conexões e da substituição dos elementos de vedação necessários, restabelecendo a estanqueidade do sistema.

Paralelamente, foram definidos e ajustados os pontos de instalação dos sensores de fim de curso indutivos e capacitivos, responsáveis pela confirmação das posições de

abertura e fechamento das válvulas e pelo envio desses sinais ao sistema de controle. Após a realização dessas adequações, novos ensaios confirmaram o funcionamento confiável dos conjuntos hidráulicos e dos dispositivos de instrumentação, validando sua operação para as etapas subsequentes do comissionamento da planta.

Figura 4.16 – Instalação dos sensores de fim de curso.



Ademais, durante os testes operacionais do sistema de alimentação de Combustível Derivado de Resíduos (CDR), foi realizado, de forma integrada, o comissionamento do moto vibrador instalado no silo de alimentação. O objetivo desse ensaio foi verificar sua eficiência na prevenção da formação de pontes e da compactação do combustível, fenômenos característicos de materiais particulados heterogêneos que podem comprometer o escoamento gravitacional do combustível. Além da verificação do correto funcionamento mecânico e elétrico do equipamento, foi realizada a parametrização do seu acionamento, definindo-se os intervalos entre os ciclos de vibração e o tempo de atuação em cada ciclo, de modo a manter o fluxo contínuo do CDR sem provocar compactação ou desgaste excessivo dos componentes. Após os ajustes, observou-se que o moto vibrador promoveu a movimentação adequada do combustível, evitando a formação de vazios no interior do silo e garantindo o abastecimento contínuo da rosca alimentadora e, conseqüentemente, do reator de gaseificação.

Figura 4.17 – Silo com cigarro após funcionamento do moto vibrador.



Teste de estanqueidade das linhas de GLP e CO₂

Também foram realizados os testes de estanqueidade das linhas de GLP e de CO₂, ambas essenciais para a segura operação da planta. O ensaio consistiu na pressurização controlada das tubulações, seguida da inspeção criteriosa de todas as juntas soldadas, conexões e pontos de união, com o objetivo de identificar possíveis vazamentos. Durante a inspeção, foram constatados pequenos vazamentos localizados em algumas soldas, os quais foram prontamente corrigidos por meio de retrabalho dos cordões de solda e nova verificação de estanqueidade. Após a execução das correções, as linhas foram novamente pressurizadas, não sendo observadas perdas de pressão ou indícios de vazamento, confirmando a integridade do sistema. A aprovação desse ensaio garantiu que as linhas de GLP, utilizadas na ignição e aquecimento inicial do reator, e de CO₂, destinadas à inertização do sistema durante as paradas operacionais, atendessem aos requisitos de segurança e confiabilidade necessários para o prosseguimento do comissionamento da planta.

Teste a frio do sistema do flare

Como parte das atividades de comissionamento a frio, foram realizados os testes funcionais do sistema do flare, responsável pela queima controlada do syngas durante as etapas de partida, parada e situações de emergência da planta. Inicialmente, procedeu-se

à instalação do queimador, das linhas de alimentação de Gás Liquefeito de Petróleo (GLP), utilizada para ignição da chama, e da linha de dióxido de carbono (CO_2), destinada à inertização do sistema em condições de segurança.

Durante os primeiros testes, foi identificada uma não conformidade na linha de alimentação de GLP, que originalmente utilizava um trecho em mangueira flexível próximo ao queimador. Em função da elevada temperatura gerada durante a operação, esse componente apresentou degradação, tornando inadequada sua utilização nessa região da instalação. Como medida corretiva, o trecho final da linha foi substituído por tubulação metálica, material mais adequado para suportar as condições térmicas impostas pelo funcionamento do flare. Após a modificação, novos testes foram realizados, confirmando a confiabilidade e a integridade da linha de alimentação de combustível.

Figura 4.18 – Teste de acionamento do flare.



Além da avaliação da integridade mecânica do conjunto, foram executados testes para validação da sequência automática de ignição do flare. Nessa etapa, foram ajustados e parametrizados o tempo de centelhamento da vela de ignição, o tempo de abertura das válvulas solenóides responsáveis pelo fornecimento de GLP, bem como a lógica de

acionamento implementada no sistema de automação. Também foram verificados os intertravamentos de segurança, garantindo que a liberação do combustível, a geração da centelha e a inertização do sistema ocorressem apenas quando todas as condições operacionais previstas em projeto fossem atendidas.

Os resultados obtidos demonstraram o correto funcionamento do sistema de ignição e dos dispositivos de segurança do flare, evidenciando a importância da etapa de comissionamento para a identificação e correção de não conformidades antes do início da operação da planta. Os ajustes realizados contribuíram para aumentar a confiabilidade operacional do sistema e assegurar o atendimento aos requisitos de segurança estabelecidos para a operação do processo de gaseificação.

Com a conclusão dos testes de comissionamento a frio, verificou-se que todos os sistemas da planta se encontravam devidamente integrados e operacionais, atendendo aos requisitos estabelecidos para a etapa de pré-operação. As atividades desenvolvidas durante a implantação possibilitaram validar o funcionamento dos equipamentos, das instalações mecânicas, hidráulicas, elétricas, de instrumentação e automação, além de identificar e corrigir não conformidades que poderiam comprometer a segurança e a confiabilidade operacional da unidade.

Dessa forma, os resultados obtidos demonstram que o processo de implantação e comissionamento foi conduzido de maneira satisfatória, proporcionando as condições necessárias para o início da operação da planta e evidenciando a importância do planejamento, da integração e da execução criteriosa dos testes de validação. Assim, os resultados apresentados ao longo deste capítulo evidenciam o êxito da implantação e do comissionamento da planta de gaseificação, servindo de base para as considerações finais apresentadas no capítulo seguinte.

5. Conclusão

O presente trabalho teve como objetivo acompanhar e descrever as etapas de implantação e comissionamento de uma planta piloto de gaseificação em leito fluidizado circulante destinada à produção de gás de síntese a partir de Combustível Derivado de Resíduos (CDR). Acompanhando todas as fases da implantação, foi possível compreender a complexidade envolvida na integração dos sistemas mecânicos, hidráulicos, elétricos, de instrumentação e automação que compõem a unidade.

Durante o desenvolvimento do projeto verificou-se que a correta sequência de montagem, associada ao planejamento das interligações entre os equipamentos, foi determinante para reduzir retrabalhos e possibilitar a realização dos testes de comissionamento com segurança. Os testes a frio permitiram identificar e corrigir não conformidades relacionadas à estanqueidade, parametrização dos equipamentos, ajustes mecânicos, sistemas hidráulicos, linhas de gases, instrumentação e automação, assegurando que a planta estivesse apta para as etapas posteriores de operação.

Os resultados obtidos demonstram que o processo de implantação extrapola a simples instalação física dos equipamentos, exigindo constante integração entre diferentes áreas da engenharia para garantir confiabilidade operacional, segurança e atendimento aos requisitos de projeto. As adequações realizadas durante o comissionamento evidenciaram a importância dessa etapa para a redução de falhas e para o aumento da disponibilidade operacional da unidade.

Do ponto de vista acadêmico e profissional, o acompanhamento integral da implantação proporcionou uma oportunidade singular de aplicação prática dos conhecimentos adquiridos ao longo da graduação, permitindo compreender aspectos construtivos, operacionais e de gerenciamento de projetos industriais dificilmente abordados apenas em ambiente acadêmico.

Como perspectivas para trabalhos futuros, recomenda-se a realização dos testes a quente da planta, a avaliação da eficiência energética do sistema, a caracterização da composição do gás de síntese produzido e estudos voltados à otimização da recuperação térmica, do sistema de limpeza do gás e do desempenho global da unidade.

Referências

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16849:2020.** *Combustível derivado de resíduos (CDR) — Classificação e especificação*. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.
- BABCOCK & WILCOX COMPANY. *Steam: its generation and use*. 41. ed. Barberton: Babcock & Wilcox, 2005.
- BASU, Prabir. *Biomass gasification, pyrolysis and torrefaction: practical design and theory*. 3. ed. Amsterdam: Academic Press, 2018. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812992-0.00007-8>
- BASU, Prabir. *Combustion and gasification in fluidized beds*. Boca Raton: CRC Press, 2006. <https://doi.org/10.1201/9781420005158>
- BEHRINGER, Ronald (Ed.). *Coal combustion and gasification*. New York: Nova Science Publishers, 2010.
- BRIDGWATER, A. V. Renewable fuels and chemicals by thermal processing of biomass. *Chemical Engineering Journal*, Amsterdam, v. 91, n. 2-3, p. 87-102, 2003. [https://doi.org/10.1016/S1385-8947\(02\)00142-0](https://doi.org/10.1016/S1385-8947(02)00142-0)
- ÇENGEL, Yunus A.; BOLES, Michael A. *Thermodynamics: an engineering approach*. 8. ed. New York: McGraw-Hill Education, 2015.
- FELDER, Richard M.; ROUSSEAU, Ronald W.; BULLARD, Lisa G. *Elementary principles of chemical processes*. 4. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2016.
- GLASSMAN, Irvin; YETTER, Richard A.; GLUMAC, Nick G. *Combustion*. 5. ed. Amsterdam: Academic Press, 2014.
- HIGMAN, Christopher; VAN DER BURGT, Maarten. *Gasification*. 2. ed. Amsterdam: Elsevier, 2008.
- INCROPERA, Frank P.; DEWITT, David P.; BERGMAN, Theodore L.; LAVINE, Adrienne S. *Fundamentals of heat and mass transfer*. 7. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2014.
- KUNII, Daizo; LEVENSPIEL, Octave. *Fluidization engineering*. 2. ed. Boston: Butterworth-Heinemann, 1991. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-050664-7.50014-7>
- PERRY, Robert H.; GREEN, Don W. *Perry's chemical engineers' handbook*. 8. ed. New York: McGraw-Hill, 2008.

REED, Thomas B.; DAS, Avinash. *Handbook of biomass downdraft gasifier engine systems*. Golden: Solar Energy Research Institute (SERI), 1988.
<https://doi.org/10.2172/5206099>